

Maíz tardío en Entre Ríos:
Fertilización nitrogenada, densidad y eficiencia en el uso del nitrógeno

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,
Área Producción Vegetal*

Santiago Teofilo Diaz Valdez
Ingeniero Agrónomo - Universidad de Buenos Aires - 2003

Monsanto Argentina SAIC



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires

COMITÉ CONSEJERO

Director de Tesis

Fernando O García

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Master of Science (Kansas State University)

Doctorado Ph.D. (Kansas State University)

Co-director de Tesis

Octavio P Caviglia

Ingeniero Agrónomo (Universidad Nacional de Entre Rios)

Doctor (Universidad Nacional de Mar del Plata)

JURADO DE TESIS

JURADO

Helena Rimski-Korsakov

Ingeniera Agrónoma (Universidad de Buenos Aires)

Doctora en Ciencias Agropecuarias (Universidad de Buenos Aires)

JURADO

Pablo Prystupa

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Magister en Producción Vegetal (Universidad de Buenos Aires)

JURADO

Fernando Salvagiotti

Ingeniero Agrónomo (Universidad de Buenos Aires)

Doctorado Ph.D. (University of Nebraska)

Fecha de defensa de la tesis: 17 de ABRIL de 2019

DEDICATORIA

A Mery, quien me acompaña hace más de 13 años, y a nuestros hijos Santi, Marcos, Cami y Paz. Para ellos cinco, este trabajo, por todas las veces que fueron postergados y a pesar de eso me motivaron para poder cumplir este desafío.

A mis padres, Carmen y Santiago, por trasmitirme la pasión por el campo, ser mis primeros maestros en la profesión y sobre todo por el ejemplo que me dieron todos estos años. A mis hermanos, Nicolás, Francisco y Dolores, por estar a mi lado cuando los necesito.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a todos aquellos que de alguna u otra manera me acompañaron, me formaron y me dieron desinteresadamente lo mejor de ellos para la realización de este trabajo.

En especial quiere agradecerle a Fernando Garcia, por su apoyo y confianza durante estos años y la forma de guiar mis ideas. Pero principalmente por la forma de transmitir los valores de la vida. A Octavio Caviglia, por su pensamiento crítico, su forma de abordar los problemas ha sido fundamental para mí desarrollo, no solo a la hora de la realización de este trabajo, sino para aplicarlos ante los distintos desafíos que plantea la agronomía.

A los diferentes productores que pusieron a disposición su campo y maquinaria para la realización de los ensayos, a Esteban Cabrera y Pablo Glagovsky, ya que no solo se involucraron con los ensayos, sino también compartieron su experiencia.

A los que en congresos o presentaciones se interesaron por el trabajo y me han dado críticas constructivas para su posterior desarrollo.

Al equipo de TD de Monsanto. A Fernando, y Juan Manuel, quienes siendo mis jefes me dieron la oportunidad de encarar el proyecto más allá de mis obligaciones diarias. A Matias por sus consejos y acompañamiento durante todos estos años. A Santiago Mazzini, que confió en el proyecto y permitió la financiación del mismo aun en épocas complicadas.

A la Facultad de Agronomía de la Universidad de Buenos Aires.

Y a todos aquellos que no estoy nombrando, pero me han aconsejado de manera desinteresada.

Muchas gracias.

DECLARACION

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en esta u otra institución.

Santiago T Diaz Valdez

PUBLICACIONES DERIVADAS DE ESTA TESIS

Contribuciones en congresos y reuniones científicas:

Diaz Valdez ST; Garcia FO; Caviglia OP (2014) Maíz tardío en Entre Ríos: Calibración de umbrales críticos en nitrógeno. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Buenos Aires, Actas en CD.

Diaz Valdez ST; Garcia FO; Caviglia OP (2016) Maíz tardío en Entre Ríos: Eficiencia agronómica de uso del nitrógeno y sus componentes. XXV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Buenos Aires, Actas en CD.

Trabajos de divulgación:

Diaz Valdez ST; Garcia FO; Caviglia OP (2014) Maíz tardío en Entre Ríos, Argentina: Calibración de umbrales críticos en nitrógeno. Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica de IPNI 13: 18-20.

ÍNDICE GENERAL

Contenidos	Página
Índice de Tablas	X
Índice de Figuras	XIII
Índice de ecuaciones	XV
Abreviaturas	XVI
Resumen	XVIII
Abstract	XIX
Capítulo 1	
Introducción General	1
1.1. Presentación del problema	2
1.2. Objetivos e hipótesis	5
Capítulo 2	
Maíz tardío en Entre Ríos: Respuesta a la Fertilización Nitrogenada y Calibración de Umbrales Críticos de N disponible del suelo	6
2.1. Introducción	7
2.2. Materiales y Métodos	8
2.2.1. Descripción de los experimentos y manejo	8
2.2.2. Diseño experimental y tratamientos	9
2.2.3. Muestreos de suelo	9
2.2.4. Calibración del umbral crítico	9
2.2.5. Árbol de decisiones	10
2.3. Resultados	10
2.3.1. Caracterización de los sitios	11
2.3.2. Rendimiento	13
2.3.3. Calibración del umbral crítico	14
2.3.3.1. Comparación de modelos	16
2.3.3.2. Comparación de momentos y profundidades de muestreo	17
2.3.3.3. Calibración de umbrales por ambientes	19
2.3.4. Árbol de decisiones	20
2.4. Discusión	21
2.4.1. Respuesta a la fertilización y calibración del umbral crítico	21
2.5. Conclusiones	26
Capítulo 3	
Maíz tardío en Entre Ríos: Efecto de la fertilización nitrogenada y cambios en la densidad sobre la Eficiencia Agronómica de Uso del Nitrógeno	27
3.1. Introducción	28
3.2. Materiales y Métodos	29
3.2.1. Descripción de los experimentos y manejo	29
3.2.2. Diseño experimental y tratamientos	29
3.2.3. Mediciones	29

3.2.3.1 Muestreos de suelo	29
3.2.3.2. Caracterización nutricional de los cultivos	29
3.2.3.2.1. Índice nutricional del nitrógeno (INN)	29
3.2.3.2.2. Índice de verdor (IV)	30
3.2.3.3. Radiación interceptada (Ri)	30
3.2.3.4. Hojas verdes a madurez fisiológica	30
3.2.3.5. Producción de materia seca (MS) y componentes de rendimiento	30
3.2.3.6. N acumulado en materia seca y partición	30
3.2.3.7. Estimación de índices de eficiencia	31
3.2.4. Análisis estadístico	31
3.3. Resultados	32
3.3.1. Caracterización de los sitios	32
3.3.2. Efecto de la fertilización con N sobre las diferentes variables	32
3.3.2.1. Caracterización nutricional de los cultivos	32
3.3.2.1.1. Índice nutricional de nitrógeno (INN)	32
3.3.2.1.2. Índice de verdor (IV)	33
3.3.2.2. Radiación interceptada (Ri)	33
3.3.2.3. Hojas verdes a madurez fisiológica	34
3.3.2.4. Producción de materia seca (MS) y componentes de rendimiento	34
3.3.2.5. N acumulado en materia seca y partición	35
3.3.2.6. Índices de eficiencia en el uso del N	36
3.3.3 Efecto de la densidad y la fertilización N sobre las diferentes variables	38
3.3.3.1. Caracterización nutricional del cultivo	38
3.3.3.1.1. Índice nutricional del nitrógeno (INN)	38
3.3.3.1.2. Índice de verdor (IV)	38
3.3.3.2. Radiación interceptada (Ri)	39
3.3.3.3. Hojas verdes a madurez fisiológica	40
3.3.3.4. Producción de materia seca (MS) y componentes de rendimiento	40
3.3.3.5. N acumulado en materia seca y partición	42
3.3.3.6. Índices de eficiencia del uso del N en función de la densidad y la fertilización	44
3.4. Discusión	46
3.4.1. Condiciones ambientales exploradas	46
3.4.2. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre la MS y acumulación de N en planta	47
3.4.3. Efecto de la densidad y de la interacción densidad x N sobre la MS y acumulación de N en planta.	49
3.4.4. Efecto de fertilización nitrogenada y cambios en la densidad de plantas sobre la EAN y sus componentes	50
3.5. Conclusiones	51

Capítulo 4	
Implicancias de los resultados y posibles investigaciones derivadas del trabajo	52
4.1. Contraste de hipótesis	53
4.2. Implicancia de los resultados	53
4.3. Posibles investigaciones derivadas del trabajo	55
Bibliografía	57

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
2.1. Análisis de suelo 0-20 cm en presiembra (PS) en los sitios estudiados en los experimentos de microparcels (MP) y franjas (Fr).	11
2.2. Agua disponible (mm) en el suelo profundidad (0-120 cm) en presiembra (PS) y emergencia de estigmas (R1) y precipitaciones (mm) para los períodos siembra-madurez fisiológica (S-MF) y durante el período crítico ($R1 \pm 15$ días) para los distintos experimentos de microparcels (MP) y franjas (Fr).	12
2.3. Nitrógeno disponible (Nd) en presiembra (PS) y en V6 para las diferentes localidades donde se realizaron ensayos de microparcels (MP) y franjas (Fr).	12
2.4. Rendimiento promedio de los diferentes experimentos en microparcels (MP) para las campañas 2011-2012 y 2012-2013 en función de la dosis de N aplicada. E.E: Error Estándar.	13
2.5. Rendimiento promedio de los diferentes experimentos en franja en las campañas 2011-2012 y 2012-2013 en función de la dosis de N aplicada. E.E: Error Estándar.	14
2.6. Parámetros para una función lineal-plateau que relaciona el Nitrógeno disponible (Nd, suelo (0-60 cm) + fertilizante) en el muestreo realizado en presiembra (PS) con el rendimiento de cada uno de los diferentes experimentos. Donde (a) representa la ordenada de origen (kg ha^{-1}), (b) la respuesta en rendimiento a cambios en la disponibilidad de N (kg grano ha^{-1} por kg N^{-1}) y (C) es el umbral crítico (kg N ha^{-1}).	15
2.7. Estadística descriptiva para los diferentes parámetros: D.E: Desvío estándar; Mín: Mínimo; Max: Máximo; P (10) Percentil 10; P (90) Percentil 90.	15
2.8. Parámetros para una función lineal-plateau que relaciona el Nitrógeno disponible (Nd, suelo (0-60 cm) + fertilizante) en el muestreo realizado en presiembra (PS) con el rendimiento relativo de los diferentes experimentos. Donde (a) representa la ordenada de origen (kg ha^{-1}), (b) la respuesta en rendimiento a cambios en la disponibilidad de N (kg grano ha^{-1} por kg N^{-1}) y (C) es el umbral crítico (kg N ha^{-1}).	16
2.9. Parámetros para las funciones lineal-plateau y cuadrático-plateau que relacionan el Nitrógeno disponible (Nd, suelo (0-60 cm) + fertilizante) en el muestreo realizado en PS con el rendimiento relativo de los diferentes experimentos. En la función lineal-plateau (a) representa la ordenada de origen, (b) la respuesta en rendimiento a cambios en la disponibilidad de N y (C) es el umbral crítico. En la función cuadrática-plateau (a) representa la ordenada de origen, (b) la respuesta en rendimiento a cambios en la disponibilidad de N, (c) el coeficiente cuadrático y (C) es el umbral crítico.	17

2.10. Parámetros e intervalo de confianza (95%) para una función lineal-plateau que relaciona el Nitrógeno disponible (Nd, suelo + fertilizante) con el rendimiento relativo para los distintos momentos de muestreo (presiembr (PS) y V6) y las diferentes profundidades de muestreo (cm) en cada momento. Donde (a) representa la ordenada de origen (kg ha^{-1}), (b) la respuesta en rendimiento a cambios en la disponibilidad de N (kg grano ha^{-1} por kg N^{-1}) y (C) es el umbral crítico (kg N ha^{-1}).	17
2.11. Parámetros para una función lineal-plateau que relaciona el Nitrógeno disponible (Nd, suelo (0-20 cm) y (0-60 cm) + fertilizante) en presiembr (PS), con el rendimiento según el ambiente productivo. Donde (a) representa la ordenada de origen (kg ha^{-1}), (b) la respuesta en rendimiento a cambios en la disponibilidad de N (kg grano ha^{-1} por kg N^{-1}) y (C) es el umbral crítico (kg N ha^{-1}).	19
2.12. Estadística descriptiva para las localidades agrupadas en los distintos ambientes según el agua disponible en R1 (mm). D.E Desvió estándar; Mín. Mínimo; Max. Máximo; P (25) Percentil 25; P (75) Percentil 75.	26
3.1. Índice nutricional de nitrógeno (INN) a madurez fisiológica (MF) y el índice de verdor (IV) en los estadíos de V10 y R3 para las diferentes localidades y dosis de fertilizante aplicado.	33
3.2. Análisis de varianza para el % de Radiación interceptada (Ri) en R1 y número hojas verdes a madurez fisiológica en función de la dosis de N aplicada.	34
3.3. Materia seca acumulada en rastrojo (MS resto), grano (MS grano) y total (MS total), peso de mil granos (PMG) e índice de cosecha (IC) en función de la dosis de N aplicada. E.E: Error Estándar.	35
3.4. Efecto de la dosis de N sobre el N acumulado en el rastrojo (N resto), grano (N grano) y total (N total) y el índice de cosecha del nitrógeno (ICN) en función del N aplicado. E.E: Error Estándar.	36
3.5. Eficiencia agronómica de uso del nitrógeno (EAN) y sus componentes; la eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN) y la eficiencia fisiológica del nitrógeno (EFN); junto con la productividad parcial del factor N (PPF_N) en función de la dosis de N aplicado como fertilizante.	37
3.6. Análisis de la varianza para el índice nutricional de nitrógeno (INN) a madurez fisiológica (MF) y el índice de verdor (IV) en los estadíos de V10 y R3 para las diferentes localidades, dosis de fertilizante y densidades.	38
3.7. Análisis de varianza para el % de Radiación interceptada (Ri) en R1 y el número hojas verdes a madurez fisiológica en función de la dosis de N aplicada y la densidad.	39
3.8. Materia seca acumulada en rastrojo (MS resto), grano (MS grano) y total (MS total), peso de mil granos (PMG) e índice de cosecha (IC)	41

en función de la dosis de N aplicada y la densidad para dos localidades. E.E: Error Estándar.

3.9. Efecto de la dosis de N y la densidad sobre el N acumulado en el rastreo (N resto), grano (N grano) y total (N total) y el índice de cosecha del nitrógeno (ICN) en función del N aplicado y la densidad de plantas. E.E: Error Estándar. 43

3.10. Eficiencia agronómica del nitrógeno (EAN) y sus componentes; la eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN) y la eficiencia fisiológica del nitrógeno (EFN); junto con el factor parcial de productividad N (PPF_N) en función de la dosis de N aplicado y la densidad. 45

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
2.1. Gráfico de cajas para analizar la variabilidad en el N disponible (Nd) en el suelo a la siembra, según la profundidad de muestreo (cm) en (a) las profundidades 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm; en (b) 0-60 cm. Cajas blancas muestran datos de la campaña 2011-2012. Cajas grises muestran datos de la campaña 2012-2013. Cada grafico muestra la media (punto dentro de la caja), la mediana o Q2 (50% de los datos) el Q1 (25% de los datos), el Q3 (75% de los datos). Los bigotes marcan valores atípicos.	13
2.2. Rendimiento en función del N disponible (Nd, suelo (0-60 cm) +fertilizante) en presiembra (PS).	14
2.3. Rendimiento en función del N disponible (Nd, suelo (0-60 cm) +fertilizante) en presiembra (PS) para los diferentes experimentos.	15
2.4. Rendimiento Relativo (%) en función del N disponible (Nd, suelo (0-60 cm) +fertilizante) en presiembra (PS).	16
2.5. Distribución de los residuales (Y observado – Y predicho) para el modelo lineal plateau (a) y para el modelo cuadrático plateau (b) para el Rendimiento Relativo en función del N disponible (Nd, suelo (0-60 cm) +fertilizante).	17
2.6. Rendimiento Relativo (%) en función del N disponible (Nd, suelo +fertilizante) en el muestreo de presiembra (PS) para las distintas profundidades de muestreo.	18
2.7. Rendimiento Relativo (%) en función del N disponible (Nd, suelo +fertilizante) en V6 para las distintas profundidades de muestreo.	18
2.8. Rendimiento en función del N disponible (Nd, suelo (0-20 cm) +fertilizante) en presiembra (PS) para 3 ambientes diferentes. Triángulos negros representan los ambientes menores a 6000 kg ha ⁻¹ , círculos rojos ambientes entre 6000 y 9000 kg ha ⁻¹ y cuadrados azules ambientes de más de 9000 kg ha ⁻¹ .	20
2.9. Árbol de decisiones para explicar el rendimiento. La primera apertura se realiza según el agua disponible en emergencia de estigmas (R1). En las localidades con menos de 158 mm de agua disponible en R1, se produce una nueva apertura por el Nitrógeno disponible (Nd, suelo (suelo 0-20 cm)), esa apertura considera localidades con menos o más de 48 kg N ha ⁻¹ . En las localidades donde el agua disponible en R1 fue mayor a 158 mm, la apertura se da por Nitrógeno disponible (Nd, suelo (0-20 cm) +fertilizante), donde la apertura considera Nd de 80 kg N ha ⁻¹ . En las cajas se observa en rojo la variable que genera la apertura, la media para los datos dentro de esa partición, el desvío estándar (D.E) y la cantidad de observaciones (Obs) que componen cada partición.	20
2.10. Gráfico de cajas para analizar la variabilidad en el Nitrógeno disponible (Nd, suelo (0-20 cm)) en los diferentes lotes según el	24

muestreo se realice en presiembra (PS) (caja gris) o en V6 (caja blanca). Cada grafico muestra la media (punto dentro de la caja), la mediana o Q2 (50% de los datos) el Q1 (25% de los datos), el Q3 (75% de los datos). Los bigotes marcan valores atípicos.

- 3.1. Productividad parcial del factor N (PPF_N) para las 3 localidades en función de la dosis de N aplicado: 50 kg N ha⁻¹ (barras negras) y 150 kg N ha⁻¹ (barras grises). Letras diferentes expresan diferencias significativas en la respuesta al N para una misma localidad. 37
- 3.2. Variación en el número de hojas verdes a madurez fisiológica (MF) por debajo de la espiga, para tres densidades diferentes: 40000 plantas ha⁻¹, 70000 plantas ha⁻¹ y 100000 plantas ha⁻¹, al variar las dosis de N. Las barras blancas, grises y negras representan las dosis de 0, 50 y 150 kg N ha⁻¹ respectivamente, para cada una de las tres densidades. Para una misma densidad, medias acompañadas de letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis de N según test LSD ($\alpha=0.05$). 40
- 3.3. Variación de la materia seca total (MS Total) para las diferentes densidades (plantas ha⁻¹) en función de diferentes dosis de N aplicado: 0 kg N ha⁻¹ (barras blancas), 50 kg N ha⁻¹ (barras grises) y 150 kg N ha⁻¹ (barras negras). Letras diferentes expresan diferencias significativas en la respuesta al N para una misma densidad. 42
- 3.4. Nitrógeno acumulado en el grano (N grano) a madurez fisiológica para las diferentes densidades en función de diferentes dosis de N aplicado: 0 kg N ha⁻¹ (barras blancas), 50 kg N ha⁻¹ (barras grises) y 150 kg N ha⁻¹ (barras negras). Letras diferentes expresan diferencias significativas en la respuesta al N para una misma densidad. 44
- 3.5. Productividad parcial del factor Nitrógeno (PPF_N) para las diferentes densidades (a) y distintas localidades (b) en función del N aplicado con el fertilizante 50 kg N ha⁻¹ (barras grises) y 150 kg N ha⁻¹ (barras negras). Letras diferentes expresan diferencias significativas en la respuesta al N para una misma densidad o una misma localidad. 46
- 3.6. Esquema de la ubicación del período crítico y del llenado de los granos de DK72-10, para una fecha de siembra del 1 de septiembre (fecha tradicional, barra roja) o del 22 de diciembre (fecha tardía, barra verde). La línea azul representa la radiación, la negra la temperatura media y la amarilla el fotoperíodo según datos promedios de 40 años para el departamento de Gualeguaychú. 48

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación	Página
2.1 $RR (\%) = (\text{rendimiento del tratamiento } i / \text{rendimiento más alto del sitio}) \times 100$	9
2.2 $Y = a + b x \quad x < C$	9
2.3 $Y = P \quad x \geq C$	9
2.4 $Y = a + b x + c x^2 \quad x < C$	10
2.5 $Y = P \quad x \geq C$	10
3.1 $N_c = 34,12 \times MS \text{ total}^{-0,391}$	29
3.2 $INN = (\% N \text{ en planta} / N \text{ Crítico})$	29
3.3 $\% Ri = 100 ((1 - (I_t / I_0))$	30
3.4 $EAN = \frac{\Delta \text{ kg maíz}}{\Delta N \text{ absorbido}} \times \frac{\Delta N \text{ absorbido}}{\Delta N \text{ aplicado}} = \frac{\Delta \text{ kg maíz}}{\Delta N \text{ aplicado}}$	31
3.5 $EFN = \frac{\Delta \text{ kg maíz}}{\Delta N \text{ absorbido}}$	31
3.6 $ERN = \frac{\Delta N \text{ absorbido}}{\Delta N \text{ aplicado}}$	31
3.7 $PPF_N = \frac{\text{Rendimiento}}{\text{kg N aplicado}}$	31

ABREVIATURAS

Abreviatura	Significado
%Ri	Porcentaje de la radiación interceptada
(R1 ± 15 días)	Período crítico
0N	0 kg N aplicado ha ⁻¹
100N	100 kg N aplicado ha ⁻¹
150N	150 kg N aplicado ha ⁻¹
25N	25 kg N aplicado ha ⁻¹
50N	50 kg N aplicado ha ⁻¹
75N	75 kg N aplicado ha ⁻¹
<i>a</i>	Ordenada de origen
<i>b</i>	Respuesta del rendimiento/rendimiento relativo a la disponibilidad de nitrógeno
<i>C</i>	Umbral crítico
<i>c</i>	Coefficiente cuadrático
<i>D</i>	Densidad
D.E	Desvió estándar
DBCA	Diseño en bloques completamente aleatorizados
DCA	Diseño completamente aleatorizado
EAN	Eficiencia agronómica del nitrógeno
<i>ec</i>	Ecuación
EFN	Eficiencia fisiológica del nitrógeno
ERN	Eficiencia de recuperación aparente del nitrógeno
Fr	Experimento en franjas
IC	Índice de cosecha
ICN	índice cosecha del nitrógeno
INN	Índice nutricional de nitrógeno
IV	Índice de verdor
<i>I</i> ₀	Radiación incidente por encima del canopeo
Loc	Localidad
<i>I</i> _t	Radiación incidente debajo de la última hoja verde
Máx	Máximo
Mín	Mínimo
MP	Experimentos en microparcels
MS	Materia seca
MS grano	Materia seca acumulada en el grano
MS resto	Materia seca acumulada en el rastrojo
MS total	Materia seca total
MT	Maíz tardío
N	Nitrógeno
N grano	Nitrógeno acumulado en el grano
N resto	Nitrógeno acumulado en el rastrojo

N total	Nitrógeno acumulado total
Na	Nitrógeno actual
Nan	Nitrógeno anaeróbico
Nc	Nitrógeno crítico
Nd	Nitrógeno disponible
NO ₃	Nitrato
<i>P</i>	Plateau
P (10)	Percentil 10
P (25)	Percentil 25
P (75)	Percentil 75
P (90)	Percentil 90
PMG	Peso de mil granos
PPF _N	Productividad parcial del factor nitrógeno
PS	Presiembra
R1	Emergencia de estigmas
Ri	Radiación interceptada
RR	Rendimiento relativo
S-MF	Período siembra-madurez fisiológica
V6	Estadío de 6 hojas liguladas
<i>Y</i>	Rendimiento

RESUMEN

Maíz tardío en Entre Ríos: Fertilización nitrogenada, densidad y eficiencia en el uso del nitrógeno

En las últimas campañas la superficie de maíz tardío (MT) en Entre Ríos se ha incrementado con el fin de evitar la coincidencia de la floración con momentos de mayor déficit hídrico. Debido a los escasos conocimientos respecto al manejo de la fertilización nitrogenada en MT, se plantearon los siguientes objetivos: i) desarrollar una metodología de diagnóstico para recomendar la fertilización a partir del nitrógeno disponible en el suelo (Nd); ii) analizar la respuesta a nitrógeno (N) y cambios en la densidad de plantas sobre la eficiencia agronómica del N (EAN) y sus componentes; la eficiencia de recuperación (ERN) y la eficiencia fisiológica (EFN). Experimentos de microparcels (4) y en franjas (8), conducidos durante dos campañas, permitieron proponer una metodología para la recomendación de la fertilización nitrogenada en MT en Entre Ríos. La relación ajustada entre el rendimiento relativo (RR) o el rendimiento y Nd, fue de tipo lineal-plateau, se logró un mejor ajuste con muestreos en presembrado (0-20 cm) que en etapas vegetativas tempranas. El rendimiento esperado se puede predecir a partir de los modelos generados que relacionan el rendimiento con el Nd, o el modelo que utiliza el RR, con niveles críticos de Nd que variaron entre 93 y 118 kg ha⁻¹ a 0-20 cm. En el caso de la EAN, este trabajo demuestra que tanto la fertilización como cambios en la densidad afectaron la EAN, y que estos se debieron a cambios en la ERN, ya que la EFN no fue modificada. Los valores superiores de ERN se observaron con dosis de 50 Kg N ha⁻¹ (0,63 kg N absorbido kg N aplicado⁻¹) y la densidad de 70000 plantas ha⁻¹ (0,62 kg N absorbido kg N aplicado⁻¹). Estos resultados contribuyen al manejo sustentable de N en MT en Entre Ríos.

Palabras Claves: Umbral- Nitrógeno Disponible- EAN- ERN- EFN- Análisis de suelo- Diagnóstico-Recomendación fertilización.

ABSTRACT**Late-season corn in Entre Rios: Nitrogen fertilization recommendation, plant population and nitrogen efficiency use**

During the last years, the late-season corn (MT) area in Entre Rios has increased to avoid the coincidence of flowering with water deficit periods. Because of the lack of information on nitrogen (N) fertilization recommendation under MT, the following objectives were proposed: i) to develop a diagnosis methodology to recommend the N rate considering the available nitrogen (soil N + fertilizer) (Nd); and ii) to analyze the effect of changes in the N rate and changes in plant population over the agronomic N efficiency (EAN) and its components; the recovery efficiency (ERN) and the physiological efficiency (EFN). Four small plots and eight strip test experiments conducted during two seasons, allowed to propose a methodology for N fertilization recommendation for MT in Entre Rios. The relationship between yield or relative yield (RR) and Nd could be adjusted with a linear-plateau function, where the best fit was obtained with pre-plant soil test (0-20 cm). Expected yield would be predicted with models that relate yield with Nd, or models which use RR, with Nd critical thresholds which vary between 93 and 118 kg N ha⁻¹. This work shows that both N fertilization and changes in plant population affected EAN, and that these changes resulted from ERN modifications, as EFN was not affected. The higher values of ERN were observed with rates of 50N (0,63 kg N absorbed kg N applied⁻¹) and plant populations of 70000 plants ha⁻¹ (0,62 kg N absorbed kg N applied⁻¹). These results contribute to the sustainable management of N for MT at Entre Rios.

Key Words: Critical thresholds- Available nitrogen- Soil sample- Nitrogen fertilization recommendation- agronomic efficiency.

Introducción General

Capítulo 1: Introducción general

1.1. Presentación del problema

En los sistemas agrícolas, la variabilidad climática es una fuente de incertidumbre y riesgo (Bert et al. 2006). En muchas regiones agrícolas del país, a pesar de que las precipitaciones anuales, en general, exceden la demanda del maíz (500-600 mm), la distribución a lo largo del año exhibe bajas precipitaciones durante el invierno y ciertos períodos del verano, siendo frecuente la ocurrencia de bajas precipitaciones en enero, lo que sumado a la alta demanda atmosférica que se registra en esta época resulta en sequías estacionales (Maddonni 2012) que afectan la variabilidad de los rendimientos. El grado de sensibilidad al estrés en maíz, depende del momento de ocurrencia del mismo (Andrade et al. 1996). Tanto el agua como el nitrógeno (N) deben estar bien provistos en cantidad y oportunidad para asegurar un estado fisiológico óptimo al momento de la floración del cultivo, momento alrededor del cual se determina el rendimiento (Andrade et al. 1996; Domínguez et al. 2001). El ajuste de la fecha de siembra es una práctica de manejo utilizada para sincronizar la ocurrencia de determinada etapa fenológica con las condiciones ambientales donde el cultivo se desarrollará y crecerá (Bonelli et al. 2016). Una posibilidad para evitar la coincidencia de la floración del maíz con la sequía estacional del verano, es retrasar la siembra hacia el final de la estación primaveral o principios del verano, de esta manera, la floración femenina ocurre a partir de mediados del verano y el período de llenado de los granos se corre a finales del verano y principios de otoño (Maddonni 2012).

En Entre Ríos, a partir de la aparición de híbridos de maíz transgénico resistentes a lepidópteros, la superficie de maíz sembrada en fechas tardías se ha ido incrementado. En el caso de que la siembra ocurra después de la cosecha de un cultivo de invierno se denomina “Maíz de Segunda”. El trigo es el cultivo invernal que en mayor proporción de superficie antecede la siembra del maíz, pero también se pueden encontrar siembras en secuencia a colza, alguna leguminosa u otro cereal de invierno. Se considera “Maíz Tardío” (MT), cuando la siembra del maíz se da sobre el rastrojo de un cultivo sembrado el año anterior, el antecesor más común es soja. El presente estudio hace foco en maíces tardíos, cuya principal ventaja es que los rendimientos mínimos aumentan otorgándole más estabilidad al productor, aunque los rendimientos máximos potenciales son menores (Mercau y Otegui 2014; Bonelli et al. 2016; Gambin et al. 2016). De esta manera, se puede optar por siembras tempranas para buscar rendimientos de alto potencial y disminuir considerablemente el daño provocado por *Spodoptera frugiperda*, o siembras tardías disminuyendo el riesgo de déficit hídrico en estadíos críticos a expensas de un menor rendimiento potencial, pero una mayor estabilidad de los rendimientos (Maddoni 2012; Caviglia et al. 2014).

Sin embargo, es poca la información disponible en esta región, como en otras, referente al manejo de la fertilización nitrogenada en maíces tardíos. El N es considerado el factor limitante más importante, después del agua, para la producción de biomasa y la fertilización nitrogenada puede proveerlo en cantidades suficientes para lograr los rendimientos potenciales alcanzables según las condiciones climáticas (Lemaire et al. 2008). En las últimas décadas, el aumento en el uso de fertilizantes nitrogenados ha contribuido al aumento de la producción de alimentos. El uso de fertilizantes nitrogenados a nivel mundial, aumento alrededor de unas 8 veces en los últimos 50 años (Tilman et al. 2001). Este aumento permitió duplicar la producción de alimentos (Austin et al., 2006). Sundquist et al. (1982) destacan que entre 1950 y 1980, el N contribuyó entre el 50 a 60% del aumento del rendimiento del maíz en EE.UU. En Argentina, el uso de fertilizantes nitrogenados en la agricultura tiene una historia menor, no fue hasta los años 70's, que se

empezaron a ver los beneficios de la fertilización con N (Austin et al. 2006), entre los años 1993 y 2013, el consumo de N en Argentina se incrementó en un 550% (González San Juan et al. 2013), y la producción de granos aumento 16.6 millones de toneladas por cada millón de toneladas de incremento en el consumo de fertilizante (García y González Sanjuan 2013). Álvarez et al. (2012) estiman que entre las campañas 1967-1968 y 2007-2008, la fertilización nitrogenada contribuyó al incremento promedio de un 16% de los rendimientos de los cultivos tradicionales de grano, esta contribución es probablemente menor que la registrada en otras regiones del mundo debido a las menores dosis aplicadas en el país, a la predominancia de soja que fija N atmosférico y a la alta fertilidad original de los suelos agrícolas.

El análisis de suelos es una práctica recomendable para el diagnóstico de la fertilización nitrogenada (García y Salvagiotti 2009), en los últimos años numerosos investigadores de diferentes áreas de la región pampeana han trabajado en obtener herramientas de diagnóstico que permitan predecir la respuesta a la fertilización. Para maíz, se han calibrado, umbrales críticos de disponibilidad de N (N-nitrato suelo, 0-60 cm, + N fertilizante), constituyéndose en el método más difundido para determinar la necesidad de N (García 2009). Para que el nivel de disponibilidad medido tenga un valor de diagnóstico, la disponibilidad tiene que estar asociada con el rendimiento (Gutiérrez Boem et al. 2013). Cuando el análisis detecta valores superiores a los del umbral crítico (C), la probabilidad de respuesta a la fertilización es baja (García y Salvagiotti 2009). Estos umbrales varían según la zona y el nivel de rendimiento objetivo (Correndo y García 2014). En Entre Ríos, Mistrorigo y Valentinuz (2004), determinaron que es necesaria una disponibilidad de 162 kg N ha⁻¹ (0-60 cm suelo+ fertilizante) para obtener un rendimiento relativo del 94%. La Cátedra de Cerealicultura de la FAUBA definió un umbral de 125 kg N ha⁻¹ (0-60 cm suelo a la siembra + fertilizante) para elevar los rendimientos potenciales, aun en condiciones ambientales no optimas, en ensayos realizados con el CREA Litoral Sur (Ruiz et al. 2004). AAPRESID-INPOFOS realizaron una red de 23 ensayos en Entre Ríos, Córdoba y Santa Fe, y propusieron que rendimientos de 10000 kg/ha se pueden obtener con una disponibilidad de 130 kg N ha⁻¹ (0-60 cm suelo a la siembra + fertilizante), mientras que los umbrales críticos de N-Nitrato en V6 fueron de 19 y 24 ppm para las profundidades 0-20 y 0-40 cm respectivamente (Bianchini et al. 2004). En cuanto al momento de muestreo-fertilización, en el sudeste de la provincia de Buenos Aires se observó que los umbrales fueron menores en V6 respecto de siembra, debido a menores pérdidas de N del sistema en V6 en comparación con el muestreo/fertilización a la siembra. Esto se tradujo en mayores eficiencias de recuperación del fertilizante en V6, cuando las tasas de absorción de N por el maíz comienzan a ser significativas (Pagani et al. 2008). Ferrari et al. (2001), en cinco ensayos conducidos en el norte de Buenos Aires y sur de Santa Fe, no encontraron diferencias entre las aplicaciones a la siembra o en V6 cuando los suelos eran Argiudoles, pero si encontraron diferencias a favor de la aplicación en V6 en dos de tres ensayos realizados en suelos Hapludoles, los autores atribuyen estos resultados al menor potencial de lixiviación que presentan los Argiudoles respecto de los Hapludoles de textura más gruesa. Todas estas observaciones corresponden a fechas de siembra tempranas.

Se ha documentado que, en fechas de siembras tardías, hay una menor proporción de crecimiento reproductivo sobre el vegetativo, debido al deterioro de las condiciones radiativas y térmicas durante el llenado de granos y al mejor ambiente para el crecimiento inicial (Cirilo y Andrade 1994; Caviglia et al. 2014). A su vez, la mineralización de la materia orgánica del suelo aumenta con las mayores temperaturas en siembras tardías, reduciendo así la respuesta al agregado del nutriente (Caviglia et al. 2005). Debido a estos dos puntos, es necesario tener una mejor comprensión del ciclo del N en el cultivo, ya que

el ambiente fototermal explorado por los maíces de siembra tardía es diferente y de menor calidad para una óptima fijación de granos, y a su vez el suelo puede presentar mayor disponibilidad de N. También es importante diferenciar situaciones de maíz tardío de las de maíces de segunda, ya que el cultivo antecesor, también afecta el ciclo del N (Salvagiotti et al. 2014) y el contenido inicial de agua en el perfil del suelo.

El rendimiento del cultivo de maíz, en un análisis centrado en el uso del N, es el resultado de la habilidad de la planta en absorber, asimilar y utilizar el N durante todo el ciclo del cultivo y la capacidad de removilización a la espiga el N acumulado en estructuras vegetativas durante el período de llenado de granos (Below 2002; Bender et al. 2012). La Eficiencia Agronómica del N (EAN) es un concepto fundamental para evaluar la productividad de los sistemas de cultivos (Fixen et al. 2014), y se ha definido como el incremento en rendimiento producido por unidad de N aplicado (Dobermann 2007; Ciampitti y Vyn 2010; Fixen et al. 2014). El estudio de la misma permite incrementar la productividad de los sistemas minimizando la pérdida de N del lote (Fixen et al. 2014).

Entender el proceso que gobierna la absorción de N y su distribución en la planta es vital para optimizar la producción del cultivo y reducir el impacto ambiental, ya que es importante aumentar la producción de alimentos minimizando la pérdida de N del sistema (Galloway et al. 2008). Una fertilización nitrogenada excesiva puede causar procesos de eutrofización, contaminación del agua y aire, acidificación del suelo, un aumento de las emisiones del óxido nitroso y gases invernadero (Vitouseck et al. 2009; Liu et al. 2010). Para la implementación de estrategias de manejo que mejoren la EAN del maíz, resulta imprescindible comprender sus componentes (Uribelarrea et al. 2007).

La (EAN) tiene dos componentes (Fixen et al. 2014, adaptado de Dobermann 2007):

- (1) Eficiencia de Recuperación Aparente del N (ERN), incremento de absorción de N por el cultivo por incremento de N aplicado.
- (2) Eficiencia Fisiológica de Uso de N (EFN), habilidad de la planta en transformar el N absorbido en rendimiento.

El análisis individual de los componentes de la EAN permite una mejor comprensión del ciclo del N en el complejo suelo-planta. Mejorar la EAN requiere que los procesos asociados a la absorción, translocación, asimilación y redistribución del N operen efectivamente (Moll et al. 1982). Se calcula que, para los cereales, la ERN del fertilizante no alcanza el 50%, siendo este porcentaje menor a medida que se incrementan las dosis de N utilizadas (Raun y Johnson 1999), por lo cual se puede considerar que existe posibilidad de mejora. La ERN es variable y afectada por la dosis, el momento, la ubicación y la fuente aplicada (Dobermann 2007), por el desarrollo y morfología del sistema radical, la presencia de microorganismos en la rizósfera, la demanda de los tejidos, y la capacidad de asimilación y almacenamiento en vacuolas, entre los mecanismos más importantes (Good et al. 2004). La EFN refleja la capacidad de la planta para utilizar el N absorbido en la producción de granos (Gallais y Coque 2005), bajas EFN son atribuidas a crecimientos por debajo del óptimo causados por una situación de stress (Dobermann 2007). Es esperable que cambios en el manejo del cultivo, afecten estas eficiencias (Cassman et al. 2002; Lemaire y Gastal 2009). El stand de plantas afecta la arquitectura de las plantas, altera los patrones de crecimiento y posee influencia sobre la producción y partición de los carbohidratos (Casal 1985; citado por Sangoi 2000). Como ejemplo, una práctica de manejo propuesta para incrementar la EAN, en siembras

tempranas de Balcarce, es el aumento de la densidad de plantas de maíz (Pietrobon 2012). Esta estrategia en siembras tardías en Entre Ríos, podría resultar útil para mejorar la EAN, aunque existe poca información sobre el efecto de la densidad de plantas sobre dicha variable en la región. Así, una mayor densidad de plantas en un ambiente con alta disponibilidad de N permitiría incrementar la EAN por una mayor ERN.

1.2. Objetivos e hipótesis

Los objetivos de este trabajo son:

1. Calibrar umbrales críticos de N a la siembra (N-nitrato suelo + N fertilizante) y en V6 (N-nitrato suelo + N fertilizante) para maíces de siembra tardía en Entre Ríos.
2. Analizar la respuesta al agregado de N y cambios en la densidad de plantas y la interacción de estos dos factores sobre la acumulación de materia seca (MS) y N, el índice de cosecha (IC) de MS y de N, y la EAN y sus dos componentes ERN y EFN.

Las hipótesis planteadas en esta investigación son:

1. En siembra tardía, los umbrales de respuesta a la fertilización nitrogenada calibrados a partir de la disponibilidad de NO_3 a la siembra y en V6, no difieren entre si debido al corto tiempo que transcurre entre esos dos momentos.
2. En maíces tardíos, un aumento en la dosis de N reduce más drásticamente la ERN que la EFN debido a que la disponibilidad de N en el suelo es mayor que en siembras tempranas, lo que resulta en una baja respuesta de la EFN.
3. En maíces tardíos, aumentos en la densidad de plantas mejoran la EAN por una mayor ERN, pero los efectos son mayores con bajas dosis de N.

**Maíz Tardío en Entre Ríos:
Respuesta a la Fertilización Nitrogenada y Calibración de Umbrales
Críticos de N disponible del suelo**

Capítulo 2: Maíz tardío en Entre Ríos: Respuesta a la Fertilización Nitrogenada y Calibración de Umbrales Críticos de N disponible del suelo

2.1. Introducción

En la provincia de Entre Ríos, la ventana tradicional de siembra de maíz comienza a fines de agosto y se extiende hasta la primera quincena de octubre. Durante ese período y en los períodos previos a la ventana de siembra coinciden temperaturas y precipitaciones relativamente bajas, lo cual restringe la oferta de nitrógeno (N) del suelo al momento de la siembra (Salvagiotti et al. 2012). En los últimos años se incrementó la tendencia de sembrar maíz tardío (MT) a partir de mediados de diciembre. Al ser una época de mayores temperaturas y mayor disponibilidad de precipitaciones, la dinámica del N se ve afectada por una mayor mineralización del N de la materia orgánica durante el período presiembrado (Salvagiotti et al. 2014), por lo tanto, es necesario generar nuevos modelos que permitan predecir la respuesta a la fertilización en situaciones de siembra tardía. La decisión acerca del manejo de la fertilización debe tomarse a partir de metodologías de diagnóstico locales y actualizadas, esto implica conocer la capacidad del suelo de proveer esos nutrientes (Barbagelata et al. 2014). La relación entre disponibilidad de un nutriente en el suelo y rendimiento de un cultivo puede establecerse en base a experimentos a campo, donde se realiza el cultivo con y sin el agregado del nutriente (Gutiérrez Boem et al. 2013). Los ensayos deben involucrar prácticas de manejo representativas a las condiciones en las cuales el modelo va a ser utilizado y ser repetidos para cubrir la mayor variabilidad ambiental (Steinbach 2007). Este tipo de ensayos es conocido como redes de fertilización y se espera que sus resultados sean transferibles a los productores (Álvarez 2007). Establecer la relación entre rendimiento y disponibilidad de nutriente, permite establecer el nivel crítico, *i.e.* delimitar un umbral de respuesta a la fertilización nitrogenada. La selección de la dosis de fertilizante apropiada es una variable que afecta la rentabilidad del maíz y está muy relacionada con el impacto ambiental de la práctica (Cerrato y Blackmer 1990).

En maíz temprano, existen modelos de fertilización que relacionan la respuesta con la disponibilidad de N a la siembra (Bianchini et al. 2004; Ruiz et al. 2004;) o en V6 (Sainz Rozas et al. 2004; Pagani et al. 2008). Las ventajas de evaluar la disponibilidad de N en V6, estarían dadas en ambientes donde se pueden registrar pérdidas importantes del nutriente en estadíos tempranos del cultivo. En maíz tardío, los niveles de N-nitratos a la siembra generalmente son superiores a los observado en maíz temprano porque la misma ocurre en un período con mayor temperatura y precipitaciones que resultan en una mayor mineralización del N orgánico del suelo (Salvagiotti et al. 2012; Caviglia et al. 2014; Coyos et al. 2018), al ser superior la cantidad de N inorgánico a la siembra y al acortarse el período siembra-V6, podrían esperarse menos diferencias entre las calibraciones con disponibilidad de N a siembra y a V6 que en siembras tempranas.

En el presente capítulo se presentan y analizan curvas de respuesta a N de maíz tardío y sus parámetros según ambiente, profundidad y momento de muestreo, con el objetivo de estimar umbrales críticos de N (N-nitrato suelo + N fertilizante).

2.2. Materiales y Métodos

2.2.1. Descripción de los experimentos y manejo

Durante las campañas agrícolas 2011-2012 y 2012-2013, se realizaron cuatro experimentos en microparcels (MP) y ocho experimentos en franja (Fr) en lotes de producción de maíz en siembra directa en diferentes departamentos de la provincia de Entre Ríos, con diferentes historias de manejo previo.

Los experimentos de MP, se condujeron en Paraná y Gualaguay (campaña 2011-2012) y Victoria y Gualaguaychú (campaña 2012-2013) sobre suelos argiudoles acuícos (INTA, Carta de Suelos de Entre Ríos, 2014). Todos los ensayos fueron sembrados entre el 27 de diciembre y el 5 de enero. La fertilización fosforada se realizó a la siembra en todos los casos, en Paraná y Gualaguay con fosfato monoamónico (grado equivalente 11-50 (23)-0) con dosis de fertilizante de 109 kg ha⁻¹ y 100 kg ha⁻¹ respectivamente. En Victoria y Gualaguaychú se fertilizó con 152 y 156 kg ha⁻¹ de superfosfato triple (grado equivalente 0-46 (20)-0). La fuente de N fue UAN en ambos años, una solución nitrogenada que contiene 32% de N (grado equivalente 32-0-0), el mismo se aplicó en post-emergencia del maíz (V6) con mochila experimental de CO₂, con una barra de cuatro picos. El CO₂, permite trabajar a presión constante y de esa manera lograr dosificaciones con mayor precisión. En todos los experimentos el híbrido utilizado fue DK72-10MGRR2. Las unidades experimentales fueron de 6 u 8 hileras de ancho por 10 metros de largo, las hileras laterales cumplen la función de zona buffer entre tratamientos y la cosecha se realizó sobre las 2 hileras centrales. En la campaña 2012-2013 se utilizaron insecticidas para el control de gusano cogollero (*Spodoptera frugiperda*), no siendo necesario el tratamiento en la campaña 2011-2012. El control de malezas se realizó químicamente, se partió con barbechos limpios, se aplicó atrazina + acetoclor + glifosato a la siembra y se repitió una aplicación de glifosato entre V5-V6.

Los experimentos en Fr de la campaña 2011-2012 fueron sembrados durante la segunda quincena del mes de diciembre en Paraná, Victoria, Gualaguay y Gualaguaychú, cercanos a los centros urbanos/rurales de Cerrito, Rincón de Nogoya, Gualaguay y Pehuajo Sud, con estos nombres se identifican los ensayos en Fr de la campaña 2011-2012. En la campaña 2012-2013, la siembra se realizó a partir del 10 de diciembre y se extendió hasta los primeros días de enero. Los ensayos fueron sembrados en Gualaguay y Gualaguaychú, en este último departamento se realizaron ensayos en 3 sitios diferentes que se denominan Larroque I, Larroque II y Gualaguaychú, y el ensayo de Gualaguay se sembró en General Galarza, con estos nombres se identifican los ensayos en Fr de esta segunda campaña. Los sitios experimentales se implantaron sobre argiudoles acuícos excepto en el caso de Gualaguaychú que corresponde a argiudol vértico (INTA, Carta de Suelos de Entre Ríos, 2014). Los ensayos en franja cuentan con la particularidad que fueron conducidos con tecnología del productor, es decir que la siembra, cosecha y demás labores culturales se realizaron con la maquinaria del productor e insumos provistos por el mismo. En todos los casos, el cultivo antecesor fue soja en lotes manejados bajo siembra directa y el híbrido utilizado DK72-10MGRR2. La disponibilidad de fósforo no fue limitante, ya que se fertilizó con este nutriente para llevar el suelo a niveles no limitantes, fueron utilizados distintos fertilizantes como arrancadores, en caso el fertilizante contenga N, para el cálculo del N disponible, este se agregó al N del suelo. En las aplicaciones del N entre V5 y V7, la fuente de N en todos los casos fue UAN (grado 32-0-0), salvo en los casos de Gualaguay y Paraná (campaña 2011-2012), que se aplicó Urea (grado 46-0-0), a la siembra, esta fue incorporada al suelo para reducir las pérdidas por volatilización esperables en los meses de diciembre y enero. En todos los ensayos hubo un correcto control de malezas e insectos.

2.2.2. Diseño experimental y tratamientos

Los ensayos de MP tuvieron un diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA) con cuatro repeticiones. Las dosis de N aplicadas fueron de 0, 25, 50, 100 y 150 kg de N ha⁻¹, en el caso de Paraná y Gualaguay; y 0, 25, 50, 75 y 150 kg de N ha⁻¹ en el caso de Victoria y Gualaguaychú. De acá en adelante se denominará a los tratamientos 0N, 25N, 50N, 75N, 100N y 150N.

En los ensayos en franja, se utilizaron dosis de 0, 25, 50, 75 y 100 kg de N ha⁻¹ dispuestos en un DCA, donde cada localidad se consideró una repetición. De acá en adelante se denominará a los tratamientos 0N, 25N, 50N, 75N y 100N. En el ensayo de Gualaguay sembrado en la campaña 2011-2012, no fue posible regular las dosis de N según la descripción de los tratamientos recientemente enumerados, por lo cual los datos de esta localidad se utilizarán solamente para la calibración del umbral crítico, considerando la dosis real de N aplicado con el fertilizante.

2.2.3. Muestreos de suelo

Los muestreos se realizaron en presiembra (PS), 6 hojas expandidas (V6) y emergencia de estigmas (R1) según la escala de Ritchie y Hanway (1982). En PS se determinó, materia orgánica, pH (1:2.5 suelo: agua), P extractable (Bray I), S-sulfatos y N anaeróbico (Waring y Bremmer 1964) a la profundidad de 0-20 cm, y N-nitratos (Bremmer 1965) considerando la profundidad del estrato, la densidad aparente y la concentración de N-nitrato a 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm. En V6, se determinó N-nitratos a 0-20 cm y 20-40 cm. En todos los casos se muestrearon tres repeticiones por localidad. En los muestreos 0-20 cm, se tomaron 30 piques por muestra, en los muestreos 20-40 y 40-60 se tomaron 10 piques por muestra. A partir de los datos de humedad obtenidos por el método gravimétrico y la densidad aparente se calculó el agua útil en PS y en R1, hasta la profundidad de 1.2 metros, siguiendo la metodología de Gil (2005). Los parámetros de capacidad de campo y punto de marchitez permanente se estimaron a través de funciones de pedotransferencia a partir de la textura y la materia orgánica (Saxton y Rawls 2006). En los resultados se presentan los valores promedio de las 3 repeticiones.

2.2.4. Calibración del umbral crítico

La calibración del umbral crítico se realizó con los datos provenientes de los ensayos de MP y Fr. El umbral crítico de N se determinó ajustando la relación del N disponible (Nd) con el rendimiento y con el rendimiento relativo del cultivo. El Nd fue calculado a través de la sumatoria de los kg de N ha⁻¹ de suelo + los kg de N ha⁻¹ provistos por el fertilizante. El rendimiento relativo se calculó sobre el tratamiento que haya tenido el rendimiento más alto en cada sitio, según la fórmula de Gutiérrez Boem et al. (2013):

$$RR (\%) = (\text{rendimiento del tratamiento } i / \text{rendimiento más alto del sitio}) \times 100 \text{ (ec. 2.1)}$$

Las funciones que relacionen rendimiento o rendimiento relativo y disponibilidad de nutriente se ajustaron por el método de mínimos cuadrados (Alvarez 2007). Se testearon funciones de tipo lineal-plateau y cuadrática-plateau.

La función lineal-plateau se define como:

$$Y = a + b x \quad x < C \text{ (ec. 2.2)}$$

$$Y = P \quad x \geq C \text{ (ec. 2.3)}$$

donde Y representa al rendimiento o rendimiento relativo, a la ordenada al origen, b la respuesta del rendimiento/rendimiento relativo a la disponibilidad de N, x los valores de Nd, C el umbral crítico de Nd, el valor umbral ocurre en el punto a partir del cual no hay respuesta en rendimiento o rendimiento relativo a incrementos de Nd y P (plateau) representa todos los valores de Nd (x) en los cuales Y se torna constante.

La función cuadrática-plateau se define como:

$$Y = a + b x + c x^2 \quad x < C \text{ (ec. 2.4)}$$

$$Y = P \quad x \geq C \text{ (ec. 2.5)}$$

donde Y representa al rendimiento/rendimiento relativo, a la ordenada al origen, b la respuesta del rendimiento o rendimiento relativo a la disponibilidad de N, c el coeficiente cuadrático, x los valores de Nd, C el umbral crítico de Nd, el valor umbral ocurre en el punto a partir del cual no hay respuesta en rendimiento o rendimiento relativo a incrementos de Nd y P (plateau) representa todos los valores de Nd (x) en los cuales Y se torna constante.

Las ecuaciones 2.2 y 2.4 se utilizan cuando el Nd (x) es menor al umbral crítico (C), situaciones donde hay respuesta a un aumento en la disponibilidad de N. Las ecuaciones 2.3 y 2.5 representan las situaciones donde en Nd (x) es mayor o igual al umbral crítico (C), en esta situación, no hay variaciones de rendimiento o rendimiento relativo debido al agregado de N. En todos los casos, los ajustes de estas ecuaciones no lineales se realizaron con el software GraphPad Prism V6.07 (GraphPad Software INC).

2.2.5. Árbol de decisiones

Para el estudio conjunto de la influencia de distintas características del suelo y clima sobre el rendimiento, se utilizó la metodología de árbol de decisiones (Loh, 2011). Los árboles de clasificación están diseñados para variables dependientes que tienen un número finito de valores desordenados, con error de predicción medido en términos de coste de clasificación errónea. Los modelos se obtienen particionando de forma recursiva los datos y ajustando un modelo de predicción más sencillo dentro de cada partición. Como resultado, la partición se puede representar gráficamente como un árbol de decisión que identifica las situaciones o combinaciones de variables en las cuales se obtiene una determinada respuesta. Para realizar el árbol de decisiones se utilizó el software JMP 10 (SAS Institute INC 2012) y se incluyeron las siguientes variables: Nd a 0-20 y 0-60 cm, agua útil en PS y R1, MO, y Nan. Siguiendo el principio de parsimonia, en el árbol que se presenta en la sección de resultados sólo se incluyeron las variables Nd a 0-20 y agua útil en R1, debido a que al resto de las variables no contribuyó a mejorar el ajuste del modelo.

2.3. Resultados

Se caracterizaron los diferentes sitios donde se realizaron ensayos de MP y Fr en función de la fertilidad de los mismos, el agua disponible en PS y R1, y las precipitaciones. Se analizó la respuesta a la dosis de N mediante el análisis de la varianza separando los ensayos según sean conducidos en Fr o MP. En el caso del análisis de los ensayos en Fr, no pudo considerarse en este análisis los datos de la localidad de Gualeguay de la campaña 2011-2012, porque no fue posible ajustar las dosis de N aplicada como fertilizante a los tratamientos planificados, i.e. 0N, 25N, 50N, 75N y 100N, pero si se pudieron utilizar los datos de esta localidad para la calibración del umbral crítico considerando el N que realmente fue aplicado. En el caso de las MP, debido al error en el

tratamiento 4, (en la campaña 2011-2012 la dosis de N aplicado fue de 100 kg N ha⁻¹ y la campaña 2012-2013 de 75 kg N ha⁻¹), se analizó cada campaña en forma individual. La calibración de umbrales críticos se realizó, en primer lugar, a partir del rendimiento y el N_d en los primeros 60 cm de suelo según el muestreo de PS, por ser este el momento y la profundidad de muestreo más común en esta como en otras regiones (Díaz Zorita y Duarte 1997; Ruiz et al. 2001; Gregoret et al. 2006; Fontanetto et al., 2008; Pagani et al. 2008; Sanchez y Muñoz, 2008). Este análisis se realizó para todos los experimentos en su conjunto, y para cada uno de ellos en forma individual. En caso de que el ajuste de la función no fuera adecuado, se realizó el mismo análisis para el conjunto de los experimentos considerando el RR. Seguidamente, se procedió a comparar el modelo lineal-plateau con el cuadrático-plateau, a partir de una prueba de hipótesis para verificar que los modelos no sean similares. Después de elegir el modelo de mejor ajuste se procedió a comparar con dicho modelo, el efecto del momento de muestreo y la profundidad del muestreo sobre los diferentes parámetros del modelo elegido y sobre el ajuste de los mismos, para verificar si existen diferencias según el momento y profundidad del muestreo; considerando 0-20 cm, 0-40 cm y 0-60 cm para PS y 0-20 cm y 0-40 cm para V6. Para finalizar, se presenta un modelo de árbol de decisiones para entender que combinación de variables están afectando el rendimiento.

2.3.1. Caracterización de los sitios

La Tabla 2.1 muestra distintos atributos de la fertilidad química de los diferentes sitios. Los datos observados son los usualmente encontrados en la región. En el caso del P, en todos los casos se observaron niveles de P Bray por debajo de los valores considerados críticos, por lo cual todos los sitios recibieron una aplicación general de fertilizante fosfatado suficiente para evitar deficiencias de P en el cultivo.

Tabla 2.1. Análisis de suelo 0-20 cm en presiembra (PS) en los sitios estudiados en los experimentos de microparcels (MP) y franjas (Fr).

Localidad	Campaña	Tipo de ensayo	N anaeróbico (kg N ha ⁻¹)	P- Bray I (ppm)	S-SO ₄ (ppm)	Materia Orgánica (%)	pH (agua 1:2.5)
Paraná	2011/12	MP	60	10,6	9,1	3,7	6,1
Victoria	2012/13	MP	70	11,3	14,0	3,0	5,4
Gualectuaychú	2012/13	MP	67	11,1	13,9	3,7	6,1
Gualectuay	2011/12	Fr	54	8,6	10,2	3,3	6,1
Pehuajo Sud	2011/12	Fr	42	8,7	11,0	3,3	5,9
Cerrito	2011/12	Fr	50	10,7	9,8	3,4	6,1
Rincón de Nogoya	2011/12	Fr	52	9,5	11,4	3,2	6,0
G. Galarza	2012/13	Fr	63	8,5	14,2	3,2	5,6
Gualectuaychú	2012/13	Fr	80	4,2	15,6	4,7	6,5
Larroque	2012/13	Fr	67	11,1	13,9	3,7	6,1
Larroque II	2012/13	Fr	64	6,9	14,3	3,1	6,2

La Tabla 2.2 muestra el agua disponible en los primeros 120 cm de profundidad en PS y R1; y las precipitaciones ocurridas entre la siembra y madurez fisiológica (MF) y durante el período crítico (R1 ± 15 días). Puede caracterizarse a la campaña 2011-2012 como una campaña húmeda, con rango de precipitaciones de siembra a madurez fisiológica de 539 a 788 mm, y la campaña 2013-2013 como una campaña seca, con rango de precipitaciones de siembra a madurez fisiológica de 300 a 543 mm.

Tabla 2.2. Agua disponible (mm) en el suelo profundidad (0-120 cm) en presiembra (PS) y emergencia de estigmas (R1) y precipitaciones (mm) para los períodos siembra-madurez fisiológica (S-MF) y durante el período crítico (R1 \pm 15 días) para los distintos experimentos de microparcelas (MP) y franjas (Fr).

Localidad	Campaña	Tipo de ensayo	Agua Disponible 0-120 cm (mm)		Precipitaciones (mm)	
			PS	R1	S-MF	R1 (+15 días)
Paraná	2011/12	MP	124	160	695	249
Guauguay	2011/12	MP	107	177	539	255
Victoria	2012/13	MP	120	132	300	101
Guauguaychú	2012/13	MP	125	64	453	75
Guauguay	2011/12	Fr	138	208	539	255
Pehuajo Sud	2011/12	Fr	186	239	788	191
Cerrito	2011/12	Fr	118	163	532	236
Rincón de Nogoya	2011/12	Fr	141	158	780	306
G. Galarza	2012/13	Fr	103	102	407	177
Guauguaychú	2012/13	Fr	122	122	450	116
Larroque	2012/13	Fr	102	82	543	50
Larroque II	2012/13	Fr	125	64	453	75

En la Tabla 2.3 se puede observar el contenido de N para cada localidad considerando diferentes profundidades de muestreo. Los datos obtenidos son representativos de lo observado en la zona en siembras tardías, en las cuales, producto de la mayor mineralización de la materia orgánica se encuentran cantidades de N mayores a las encontradas en siembras de fines de invierno-principios de primavera. También se puede observar que el contenido de N en los estratos inferiores fue menor que en las capas más superficiales.

Tabla 2.3. Nitrógeno disponible (Nd) en presiembra (PS) y en V6 para las diferentes localidades donde se realizaron ensayos de microparcelas (MP) y franjas (Fr).

Localidad	Campaña	Tipo de ensayo	Nd PS (kg ha ⁻¹)				Nd V6 (kg ha ⁻¹)		
			0-20 cm	20-40 cm	40-60 cm	0-60 cm	0-20 cm	20-40 cm	0-40 cm
Paraná	2011-12	MP	45	24	11	80	43	29	72
Guauguay	2011-12	MP	35	22	13	68	53	28	81
Victoria	2012-13	MP	46	33	14	93	66	32	98
Guauguaychú	2012-13	MP	29	21	16	66	58	26	84
Guauguay	2011-12	Fr	43	24	12	79	56	34	90
Pehuajo Sud	2011-12	Fr	39	22	12	73	39	26	65
Cerrito	2011-12	Fr	43	23	10	76	38	25	63
Rincón de Nogoya	2011-12	Fr	38	22	12	72	51	32	83
G. Galarza	2012-13	Fr	56	36	27	119	69	20	89
Guauguaychú	2012-13	Fr	48	34	25	107	58	24	83
Larroque	2012-13	Fr	29	21	16	66	58	26	84
Larroque II	2012-13	Fr	57	42	35	134	61	23	93

El box plot de la Figura 2.1 a y b, muestra que en la campaña 2012-2013, la variabilidad encontrada en el contenido de N en PS entre localidades fue mayor que en la campaña 2011-2012. Los rangos de Nd fueron de 35-45, 22-24, 10-13 y 68-80 kg N ha⁻¹ a 0-20, 20-40, 40-60 (Figura 2.1 a) y 0-60 cm (Figura 2.1 b), respectivamente, en 2011/12. En la campaña 2012/13, los rangos fueron de 29-57, 21-42, 14-33 y 66-134 kg N ha⁻¹ a 0-20, 20-40, 40-60 (Figura 2.1 a) y 0-60 cm, (Figura 2.1 b) respectivamente.

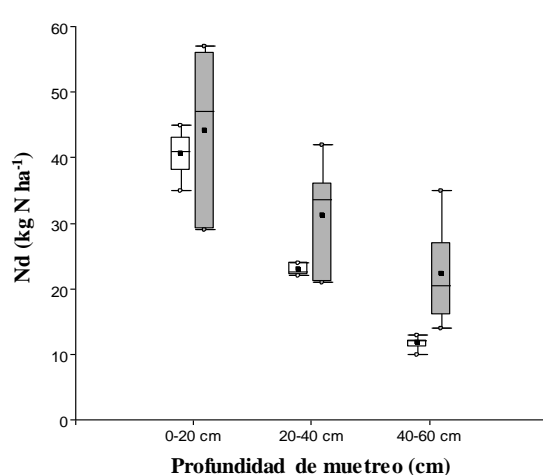


Figura 2.1 a.

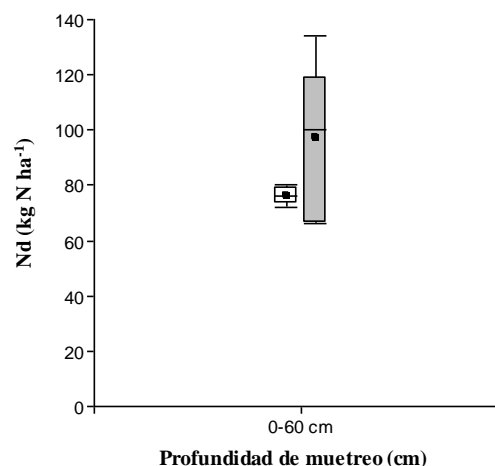


Figura 2.1 b.

Figura 2.1. Gráfico de cajas para analizar la variabilidad en el N disponible (Nd) en el suelo a la siembra, según la profundidad de muestreo (cm) en (a) las profundidades 0-20 cm, 20-40 cm y 40-60 cm; en (b) 0-60 cm. Cajas blancas muestran datos de la campaña 2011-2012. Cajas grises muestran datos de la campaña 2012-2013. Cada gráfico muestra la media (punto dentro de la caja), la mediana o Q2 (50% de los datos) el Q1 (25% de los datos), el Q3 (75% de los datos). Los bigotes marcan valores atípicos.

2.3.2. Rendimiento

La fertilización nitrogenada tuvo un efecto significativo sobre el rendimiento. En los ensayos de MP de la campaña 2011-2012 (Tabla 2.4), todos los tratamientos que recibieron N se diferenciaron de manera significativa del testigo ($P=0,0003$). Las diferencias porcentuales respecto al tratamiento sin fertilizar fueron de; 12,5%, 19,6%, 23,2% y 25,3% para las dosis de 25, 50, 100 y 150 kg N ha⁻¹, respectivamente. La diferencia entre el máximo rendimiento y el testigo fue de 2193 kg ha⁻¹. En los ensayos de MP de la campaña 2012-2013 (Tabla 2.4), también se registraron diferencias estadísticamente significativas por el agregado de N ($P<0,001$); en este caso las diferencias porcentuales para T25, T50, T75 y T150 respecto al T0, fueron de 6,7%, 10,2%, 16,4% y 20,1% respectivamente. La diferencia absoluta entre el máximo rendimiento y el testigo fue de 1219 kg ha⁻¹.

Tabla 2.4. Rendimiento promedio de los diferentes experimentos en microparcelas (MP) para las campañas 2011-2012 y 2012-13 en función de la dosis de N aplicada. EE: Error Estándar

Ensayo MP	Rendimiento (kg ha ⁻¹ ; 14.5% H)			
	Dosis de N (kg ha ⁻¹)	Campaña 2011-2012 Promedio	EE	Campaña 2012-2013 Promedio
	0	8681 C	322	6053 D
	25	9763 B	322	6458 CD
	50	10381 AB	322	6671 BC
	75	Sin Datos		7046 AB
	100	10692 A	322	Sin Datos
	150	10874 A	322	7272 A

En los ensayos en franja, también se encontró un aumento significativo sobre el rendimiento ($P<0,0001$) por el agregado de N. En la Tabla 2.5, se puede observar que, independientemente de la dosis de N aplicado con el fertilizante, todos los tratamientos que recibieron N se diferenciaron del testigo. La diferencia entre T100 y T0 fue de 877

kg ha⁻¹ (11,0%). La diferencia de T25, T50 y T75 respecto a T0, fueron 6,9%; 10,0% y 10,8% respectivamente.

Tabla 2.5. Rendimiento promedio de los diferentes experimentos en franja en las campañas 2011-2012 y 2012-2013 en función de la dosis de N aplicada. EE: Error Estándar.

Dosis de N (kg ha ⁻¹)	Rendimiento (kg ha ⁻¹ ; 14.5%)	
	Promedio	EE
0	7970 C	65.9
25	8517 B	80.8
50	8768 A	65.9
75	8835 A	65.9
100	8847 A	65.9

2.3.3. Calibración del umbral crítico

Se procedió a calcular el umbral crítico a partir del N disponible (Nd) en los primeros 60 cm de suelo en PS considerando todos los ensayos (MP y Fr). No hubo asociación significativa entre el Nd (suelo + fertilizante) en PS con el rendimiento ($P > 0,1$; $R^2 = 0,068$, para la función lineal plateau) (Figura 2.2).

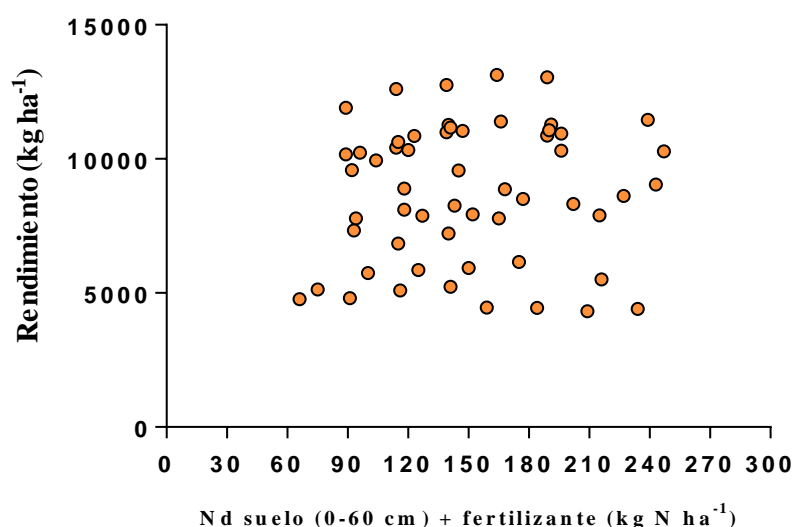


Figura 2.2. Rendimiento en función del N disponible (Nd, suelo (0-60 cm) +fertilizante) en presiembra (PS).

Al ser baja la asociación entre el Nd y el rendimiento se procedió a calcular los parámetros para una función lineal-plateau de cada experimento (Tabla 2.6). En la Tabla 2.6 se puede observar que, salvo para la localidad de Larroque II de la campaña 2012-2013 donde no se registró respuesta a N y por lo tanto el modelo no convergió, todos los demás experimentos mostraron buenos ajustes (R^2).

Tabla 2.6. Parámetros para una función lineal-plateau que relaciona el Nitrógeno disponible (Nd, suelo (0-60 cm) + fertilizante) en el muestreo realizado en presiembra (PS) con el rendimiento de cada uno de los diferentes experimentos. Donde (a) representa la ordenada de origen (kg ha^{-1}), (b) la respuesta en rendimiento a cambios en la disponibilidad de N (kg grano ha^{-1} por kg N^{-1}) y (C) es el umbral crítico (kg N ha^{-1}).

Localidad	Campaña	Tipo de ensayo	a	b	C	R ²
Guauguay	2011/2012	Fr	6019	37,1	142	0,98
Pehuajo Sud	2011/2012	Fr	8741	15,5	139	0,96
Cerrito	2011/2012	Fr	8005	23,2	135	0,85
Rincón de Nogoya	2011/2012	Fr	9428	27,8	127	0,92
G. Galarza	2012/2013	Fr	6185	12,6	181	0,80
Guauguaychú	2012/2013	Fr	4645	18,8	173	0,99
Larroque	2012/2013	Fr	3289	24,6	109	0,92
Paraná	2011/2012	MP	5379	45,7	128	0,96
Guauguay	2011/2012	MP	4614	34,7	164	0,99
Victoria	2012/2013	MP	5663	19	178	0,96
Guauguaychú	2012/2013	MP	4297	6,6	184	0,97
Larroque II	2012/2013	Fr	No convergencia			

En el resto de las localidades, la respuesta en rendimiento por kg N aplicado (parámetro b) varió entre 6,6 y 45,7 $\text{kg grano kg}^{-1} \text{N}$ aplicado, siendo la media de 24.2 $\text{kg grano kg}^{-1} \text{N}$ aplicado. Los valores del parámetro a para los cuartiles superiores (Q1 y Q3) (4614 y 8005 kg/ha) demuestran que existió una variabilidad importante entre localidades (Tabla 2.7). El umbral crítico (parámetro C) varió entre 109 y 184 kg N ha^{-1} , siendo la media de 151 kg N ha^{-1} (Tabla 2.7).

Tabla 2.7. Estadística descriptiva para los diferentes parámetros: D.E Desvío estándar; Mín: Mínimo; Max: Máximo; P (10) Percentil 10; P (90) Percentil 90.

Parámetro	Media	D.E.	Mín.	Máx.	Mediana	Q1	Q3	P (10)	P (90)
a	6024	1945	3289	9428	5663	4614	8005	4297	8741
b	24,2	11,5	6,6	45,7	23,2	15,5	34,7	12,6	37,1
C	151	26	109	184	142	128	178	127	181

La Figura 2.3 muestra las curvas de respuesta para cada una de las diferentes localidades.

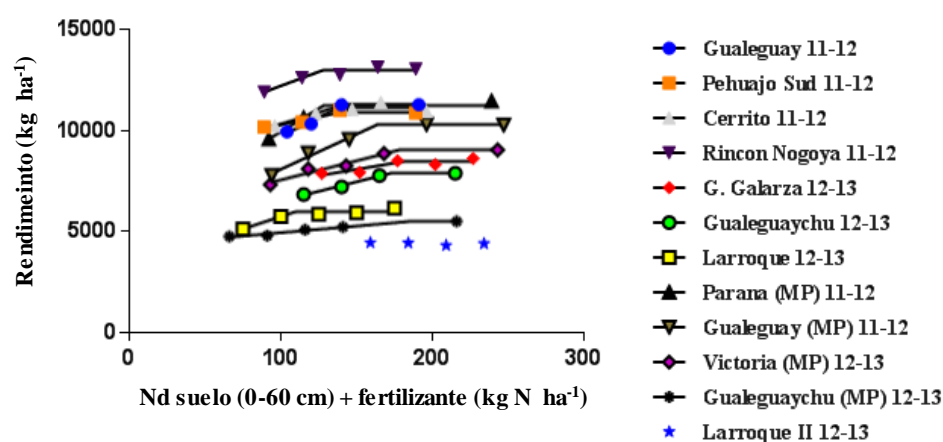


Figura 2.3. Rendimiento en función del N disponible (Nd, suelo (0-60 cm) + fertilizante) en presiembra (PS) para los diferentes experimentos.

Al constatarse que, en forma individual, salvo Larroque II, las demás localidades mostraron respuesta a aumentos en el Nd, se procedió a realizar el análisis de las diferentes localidades en su conjunto considerando el rendimiento relativo en lugar del rendimiento observado. Al utilizar un modelo lineal-plateau para explicar el efecto del Nd suelo (0-60 cm en PS) + fertilizante sobre el RR, se mejoró considerablemente el ajuste de la función (Tabla 2.8 y Figura 2.4), respecto al ajuste observado sobre el rendimiento absoluto (Figura 2.2).

Tabla 2.8. Parámetros para una función lineal-plateau que relaciona el Nitrógeno disponible (Nd, suelo (0-60 cm) + fertilizante) en el muestreo realizado en presiembra (PS) con el rendimiento relativo de los diferentes experimentos. Donde a representa la ordenada de origen (kg ha^{-1}), b la respuesta en rendimiento a cambios en la disponibilidad de N (kg grano ha^{-1} por kg N^{-1}) y C es el umbral crítico (kg N ha^{-1}).

Parámetro	Valores
a	73,1
b	0,16
C	165
R ²	0,67

En la Figura 2.4 se puede observar el modelo generado a partir de los datos generados en la campaña 2011-2012 y 2012-2013. Según los datos obtenidos el umbral crítico se obtiene con 165 kg N ha^{-1} .

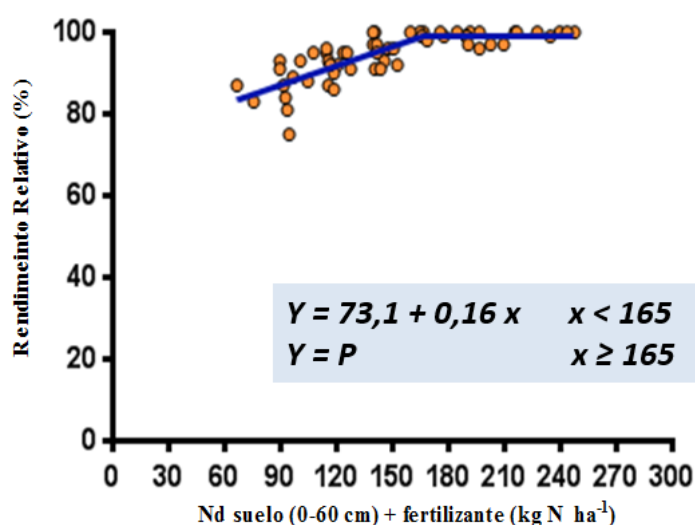


Figura 2.4. Rendimiento Relativo (%) en función del N disponible (Nd, suelo (0-60 cm) + fertilizante) en presiembra (PS).

2.3.3.1. Comparación de modelos

Mediante el programa GraphPad Prism versión 6.07, se testeó para el set de datos provenientes de los diferentes experimentos si existían diferencias en el ajuste logrado con el modelo lineal-plateau respecto al cuadrático-plateau. El valor de P fue de 0.913, por lo cual no hubo diferencia estadísticamente significativa entre modelos. En la Tabla 2.9 se presentan los valores de los parámetros de ambos modelos, y se puede observar que, para los parámetros en común, los valores fueron similares. El parámetro c (coeficiente cuadrático) del modelo cuadrático-plateau, que es el parámetro que le da la curvatura al modelo, presentó un valor muy bajo. El intervalo de confianza para dicho parámetro fue de -0,0017 a 0,0019.

Tabla 2.9. Parámetros para las funciones lineal-plateau y cuadrático-plateau que relacionan el Nitrógeno disponible (Nd, suelo (0-60 cm) + fertilizante) en el muestreo realizado en PS con el rendimiento relativo de los diferentes experimentos. En la función lineal-plateau (a) representa la ordenada de origen, (b) la respuesta en rendimiento a cambios en la disponibilidad de N y (C) es el umbral crítico. En la función cuadrática-plateau (a) representa la ordenada de origen, (b) la respuesta en rendimiento a cambios en la disponibilidad de N, (c) el coeficiente cuadrático y (C) es el umbral crítico.

Parámetro	Lineal-Plateau	Cuadrática-Plateau
a	73,1	74,4
b	0,16	0,133
c		0,000099
C	165,0	164,5
R ²	0,67	0,66

También se calcularon los residuales y se puede observar que la distribución de los mismos fue muy similar entre modelos (Figura 2.5 a y b). Al no verificarse diferencia entre modelos, siguiendo el principio de parsimonia, se decide continuar el análisis con el modelo lineal plateau, por ser más sencilla su interpretación.

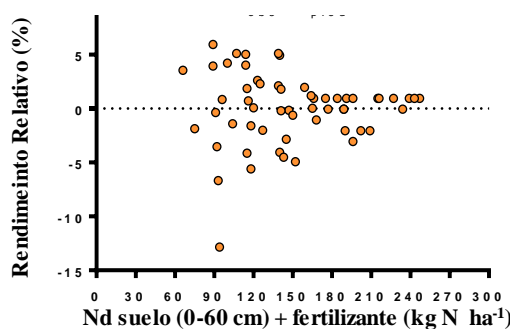


Figura 2.5 a

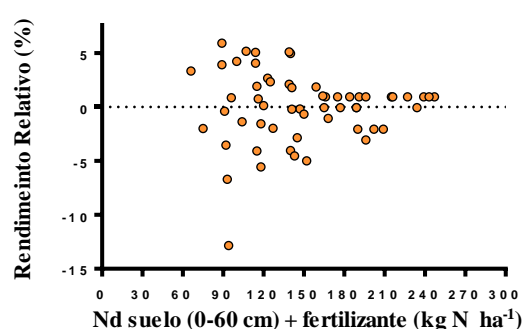


Figura 2.5 b

Figura 2.5. Distribución de los residuales (Y observado – Y predicho) para el modelo lineal plateau (a) y para el modelo cuadrático plateau (b) para el Rendimiento Relativo en función del N disponible (Nd, suelo (0-60 cm) + fertilizante).

2.3.3.2. Comparación de momentos y profundidades de muestreo

Utilizando el modelo lineal-plateau, se procedió a comparar la calibración de umbrales para distintos momentos y profundidades de muestreo. En la Tabla 2.10 se pueden observar los parámetros para las distintas variables y el R² para cada función.

Tabla 2.10. Parámetros e intervalo de confianza (95%) para una función lineal-plateau que relaciona el Nitrógeno disponible (Nd, suelo + fertilizante) con el rendimiento relativo para los distintos momentos de muestreo (presiembr (PS) y V6) y las diferentes profundidades de muestreo (cm) en cada momento. Donde (a) representa la ordenada de origen (kg ha⁻¹), (b) la respuesta en rendimiento a cambios en la disponibilidad de N (kg grano ha⁻¹ por kg N⁻¹) y (C) es el umbral crítico (kg N ha⁻¹).

Parámetro	PS			V6	
	0-20 cm	0-40 cm	0-60 cm	0-20 cm	0-40 cm
a	77,16	73,75	72,65	76,48	74,32
b	0,19	0,17	0,16	0,17	0,15
C	117,2	146,7	165,2	129,4	164,8
Intervalo de Confianza de C (95%)	103-130	130-162	148-182	111-147	142-187
R ²	0,70	0,69	0,67	0,56	0,53

Se observa que, a una misma profundidad de muestreo, el R^2 de las funciones ajustadas con los muestreos en PS fueron mayores que para las funciones cuyos muestreos de suelo se realizaron en V6. Igualmente, el intervalo de confianza del parámetro C indica que, a una misma profundidad de muestreo, no hubo diferencias significativas en los valores del parámetro entre los distintos momentos de muestreo. En PS, el R^2 para las distintas profundidades de muestreo fue similar, lo cual sugeriría que se podría optar por muestrear sólo los primeros 20 cm, que representan aproximadamente la mitad del N contenido en 0-60 cm, entre 33 y 77 kg N ha⁻¹ (Tabla 2.3), sin resignar predicción del modelo. Se realizó una prueba para verificar si el parámetro b (rendimiento relativo kg N⁻¹) y el C (umbral crítico) difiere entre las 3 funciones, y los resultados obtenidos muestran que las diferencias fueron solamente significativas para el parámetro C (P valor= 0.001). Las Figuras 2.6 y 2.7 muestran las diferentes curvas según la profundidad de muestreo para los momentos de PS y V6.

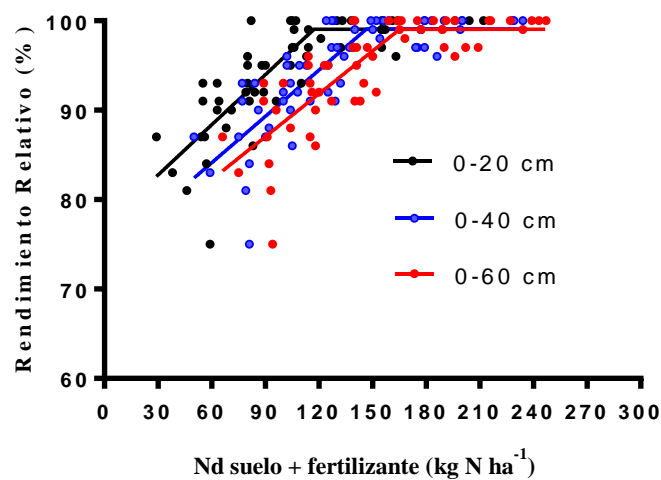


Figura 2.6. Rendimiento Relativo (%) en función del N disponible (Nd, suelo +fertilizante) en el muestreo de presiembra (PS) para las distintas profundidades de muestreo.

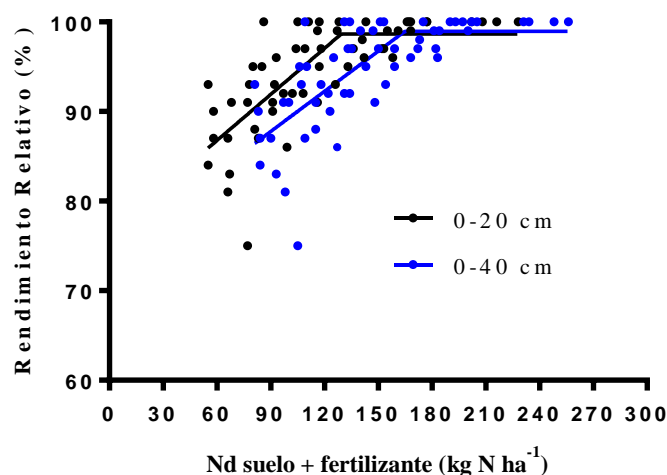


Figura 2.7. Rendimiento Relativo (%) en función del N disponible (Nd, suelo +fertilizante) en V6 para las distintas profundidades de muestreo.

2.3.3.3. Calibración de umbrales por ambiente

Según el rendimiento del tratamiento 0N, que es una medida del ambiente cuando no se fertiliza con N, se clasificaron las localidades en 3 rangos de ambientes, i.e. ambientes de menos de 6000 kg ha⁻¹, de 6000 a 9000 kg ha⁻¹ y de más de 9000 kg ha⁻¹ (Mistrorigo y Valentinuz, 2004). Utilizando el modelo lineal-plateau con los datos del muestreo de PS y la profundidad de 0-20 y 0-60 cm, se procedió a generar los 3 modelos. No se incluyeron en el análisis las localidades de Larroque II (campaña 2012-2013) y Rincón de Nogoya (campaña 2011-2012), la primera porque no se observó respuesta al agregado de N y no fue posible ajustar los datos de esa localidad a las funciones testeadas en este trabajo. En el caso de Rincón de Nogoya, si bien hubo respuesta al agregado de N, el rendimiento obtenido fue muy superior al resto de las localidades que se agruparon como ambientes de más de 9000 kg ha⁻¹, lo que generaba una reducción en el ajuste de la curva.

La Tabla 2.11 muestra los distintos modelos generados a partir del Nd en PS para las dos profundidades de muestreo. Los modelos para 0-60 cm muestran menor ajuste que los de 0-20 cm, en especial para los rendimientos menores (Tabla 2.11). Por ello, se propone utilizar los modelos de 0-20 cm. En el modelo generado para ambientes de menos de 6000 kg ha⁻¹ se puede observar que el umbral crítico (C) fue menor que en los otros ambientes y que la respuesta obtenida (b) también es menor. Para ambientes de 6000 a 9000 kg ha⁻¹ y ambientes de más de 9000 kg ha⁻¹, no hubo diferencias significativas para el umbral crítico (C) (P=0,719) y la respuesta (b) (P = 0,343), pero si fue diferente el parámetro a (P < 0,05).

Tabla 2.11 Parámetros para una función lineal-plateau que relaciona el Nitrógeno disponible (Nd, suelo (0-20 cm) y (0-60 cm) + fertilizante) en presiembra (PS), con el rendimiento según el ambiente productivo. Donde (a) representa la ordenada de origen (kg ha⁻¹), (b) la respuesta en rendimiento a cambios en la disponibilidad de N (kg grano ha⁻¹ por kg N⁻¹) y (C) es el umbral crítico (kg N ha⁻¹).

Parámetro	PS (0-20 cm)			PS (0-60 cm)		
	< 6000 kg ha ⁻¹	6000 a 9000 kg ha ⁻¹	> 9000 kg ha ⁻¹	< 6000 kg ha ⁻¹	6000 a 9000 kg h	> 9000 kg ha ⁻¹
a	4450	6304	8428	2134	6005	7610
b	13,42	20,92	25,65	40	16,24	25,04
C	93,3	101,7	107,6	85,13	137,8	142,9
R ²	0,47	0,43	0,85	0,29	0,17	0,84

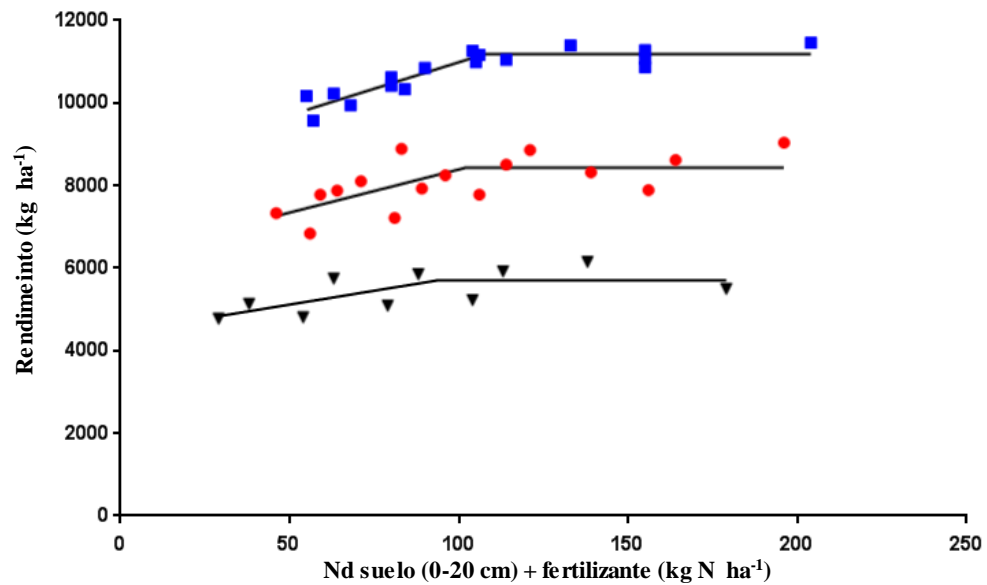


Figura 2.8. Rendimiento en función del N disponible (Nd, suelo (0-20 cm) +fertilizante) en presiembra (PS) para 3 ambientes diferentes. Triángulos negros representan los ambientes menores a 6000 kg ha⁻¹, círculos rojos ambientes entre 6000 y 9000 kg ha⁻¹ y cuadrados azules ambientes de más de 9000 kg ha⁻¹.

2.3.4. Árbol de decisiones

En la figura 2.9, se puede observar el efecto de diferentes variables sobre el rendimiento alcanzado en los experimentos.

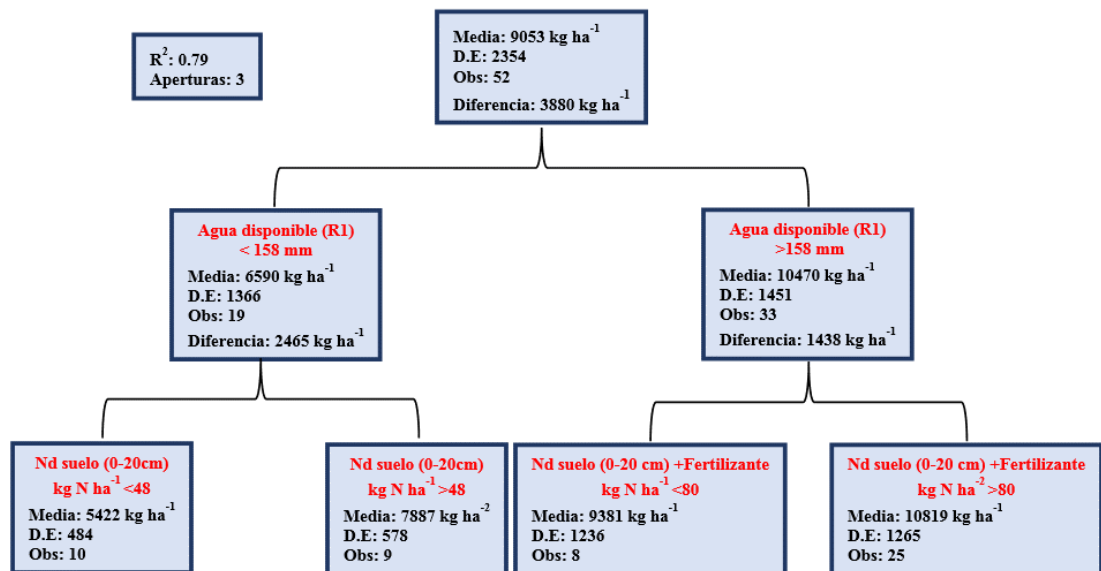


Figura 2.9. Árbol de decisiones para explicar el rendimiento. La primera apertura se realiza según el agua disponible en emergencia de estigmas (R1). En las localidades con menos de 158 mm de agua disponible en R1, se produce una nueva apertura por el Nitrógeno disponible (Nd, suelo (suelo 0-20 cm)), esa apertura considera localidades con menos o más de 48 kg N ha⁻¹. En las localidades donde el agua disponible en R1 fue mayor a 158 mm, la apertura se da por Nitrógeno disponible (Nd, suelo (0-20 cm) +fertilizante), donde la apertura considera Nd de 80 kg N ha⁻¹. En las cajas se observa en rojo la variable que genera la apertura, la media para los datos dentro de esa partición, el desvío estándar (D.E) y la cantidad de observaciones (Obs) que componen cada partición.

Se puede observar que la primera apertura se da por los mm de agua disponible en R1, la diferencia entre las localidades que acumularon más de 158 o menos de 158 mm de agua disponible en R1 fue de 3880 kg ha⁻¹. El siguiente nivel de apertura, en los ambientes de menos de 158 mm de agua disponible para R1, que a su vez fueron las localidades de menor rendimiento, fue N en el suelo (0-20 cm) sin considerar el fertilizante. En este caso la apertura se hace considerando lotes con más o menos de 48 kg N ha⁻¹ en los primeros 20 cm, la diferencia de rendimiento en este caso fue de 2465 kg ha⁻¹; esto indica que, en los lotes con déficit hídrico, el factor más importante para la definición del rendimiento estuvo relacionado con la fertilidad propia de cada sitio. Por su parte, los ambientes que en R1 presentaron más de 158 mm de agua, la apertura se realiza considerando el Nd (suelo (0-20 cm) +fertilizante), donde separa ambientes de más y de menos de 80 kg N ha⁻¹. Esto estaría indicando que cuando el agua disponible en R1 no fue un factor limitante, el agregado de N como fertilizante resultó indispensable para alcanzar altos rendimientos.

2.4. Discusión

2.4.1. Respuesta a la fertilización y calibración del umbral crítico

La fertilización nitrogenada produjo incrementos significativos en el rendimiento de los ensayos en MP y Fr (Tabla 2.4 y 2.5), esto es coincidente con lo reportado en maíces tardíos (Fontanetto et al. 2008; Salvagiotti et al. 2014; Gambin et al. 2016) y en maíces sembrados en fechas tradicionales (Melchiori et al. 2004; Bianchini et al. 2004; Gregoret et al. 2006; Pagani et al. 2009; Ferraris et al. 2012; Pagani et al. 2012). Tal respuesta es esperable debido a la deficiencia generalizada de N que presentan los suelos de la región pampeana producto de la disminución de los contenidos de MO (Sainz Rozas et al. 2011; Salvagiotti et al. 2011), y a que el N es el nutriente de mayor impacto en el rendimiento de maíz (Pagani et al. 2009; Ferraris et al. 2012; Correndo y García 2014).

Sin embargo, el ajuste de la función que muestra la respuesta en rendimiento absoluto según el Nd (suelo 0-60 cm + fertilizante) en PS, considerando todos los experimentos en conjunto, presentó una muy baja asociación cuando se consideraron valores absolutos (Figura 2.2), a pesar de ser esta la metodología de diagnóstico más difundida para la recomendación de la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz en la región pampeana (Ruiz et al. 2001; Gregoret et al. 2006; Pagani et al. 2008; Fontanetto et al., 2008 ; Sánchez y Muñoz 2008; Salvagiotti et al. 2011). Esto se puede atribuir a la gran variabilidad en la respuesta encontrada entre sitios (Tabla 2.6 y Figura 2.3). Esta variabilidad se debería a diferentes factores (clima y suelo) y a la interacción de estos factores con el manejo del maíz, que afectan de manera directa o indirecta el nivel de respuesta del cultivo al agregado de N. Dentro de los factores climáticos, el agua es el factor más importante (Bianchini et al. 2004; Maddonni et al. 2004; Ruiz et al. 2004; Álvarez y Grigera 2005; Sánchez y Ascheri 2005; Gregoret et al. 2006; Ferraris et al. 2012; Correndo y García 2014; Morris et al. 2018), sea por su efecto sobre el crecimiento del cultivo o sobre el ciclo del N en el suelo. En la Tabla 2.2, se puede observar que la variabilidad encontrada en el agua disponible en los primeros 120 cm de suelo fue mayor en R1 que en PS. La menor variabilidad encontrada en PS, podría deberse a la mayor duración del barbecho en maíces tardíos que permite una buena recarga del perfil. La mayor variabilidad encontrada en R1, puede ser atribuida a las precipitaciones ocurridas posteriores a la siembra que fueron diferentes entre sitios, y al diferente consumo por los cultivos según sitio y tratamiento. La campaña 2011-2012, se caracterizó por la abundancia de las precipitaciones durante todo el ciclo. En la campaña 2012-2013, se registró un déficit muy severo, principalmente en el período emergencia-floración y durante el período crítico (Tabla 2.2) que afectaron los rendimientos del maíz.

Dentro de las variables del suelo que afectan la respuesta, la más importante es el N disponible (Lory y Scharf 2003; Gregoret et al. 2006; Salvagiotti et al. 2011; Ferraris et al. 2012; Pasuquin et al. 2012; Correndo y García 2014; Gambin et al. 2016; Morris et al. 2018), que además cuenta con la ventaja que puede ser fácilmente cuantificable por métodos convencionales de laboratorio previos a la implantación del cultivo, que permiten predecir la probabilidad de respuesta a la fertilización y por lo tanto ser la base de desarrollo de recomendaciones de fertilización (García y Correndo 2014).

A su vez, existen factores de manejo que también pueden influir en la respuesta observada, como la práctica de la fertilización (Gudelj et al. 2005; Correndo y García 2014), fuente, dosis, momento de aplicación y ubicación del fertilizante (García y Correndo 2017), la densidad (Gambin et al. 2016) o la decisión de la fecha de siembra (Fontanetto et al. 2008). Toda esta complejidad de interacciones y factores que afectan la respuesta del cultivo al agregado de N, permiten inferir que los patrones de respuesta pueden variar entre lotes y aun en un mismo lote en diferentes campañas. Esto hace que el desarrollo de herramientas de diagnóstico para la fertilización sea un desafío (Bianchini et al. 2004). Es común hacer frente al problema de la variabilidad mediante la transformación del rendimiento en rendimiento relativo (RR) (Álvarez 2007). La transformación de los datos de rendimiento a RR, disminuyó la dispersión (Figura 2.4), el ajuste pasó de $R^2=0,06$ a $R^2=0,67$ (Tabla 2.8).

En el presente trabajo, se consideró la conveniencia de utilizar un modelo lineal plateau respecto a un modelo cuadrático plateau. Debido a la facilidad de su interpretación, de base altamente intuitiva para ser aplicado por el sector productivo, el modelo lineal plateau es ampliamente utilizado a pesar de presentar ciertas desventajas. Las críticas que recibe este modelo son: que carece de un significado biológico debido al cambio abrupto de la pendiente en la intersección de ambas rectas (Black, 1993) y que asume una eficiencia (parámetro b) constante hasta llegar al umbral. Una eficiencia constante, no permite determinar el nivel de N a alcanzar para obtener el máximo beneficio económico, solo permite decidir si conviene o no fertilizar (Álvarez, 2007), si la relación costo del fertilizante/costo maíz es menor al parámetro b, es conveniente la fertilización. Al evaluar si para el set de datos provenientes de los diferentes experimentos había diferencia en el ajuste de los modelos en relacionar el RR con el Nd, no se observaron diferencias ($P=0,9131$). Por otro lado, el valor del parámetro que da la curvatura al modelo lineal-plateau no fue distinto a 0, i.e. el intervalo de confianza al 0,05 incluyó el valor 0, esto hace que la curvatura del modelo cuadrático plateau sea prácticamente nula al acercarse al valor umbral. Como se puede observar en la Tabla 2.9, tampoco hubo diferencias en el Nd para alcanzar el umbral. Por lo cual, a pesar de la críticas hacia el modelo lineal plateau, siguiendo el principio de parsimonia, se recomienda la utilización de este modelo, ya que además de ser más sencillo, con este set de datos no se obtuvieron beneficios adicionales por la utilización del modelo cuadrático plateau en términos de ajuste. El Nd (suelo 0-60 cm + fertilizante) con el cual se llegó al umbral en el modelo lineal-plateau fue de 165 kg N ha⁻¹. Este umbral fue similar al reportado por Mistrorigo y Valentinuz (2004) en maíces tempranos en Entre Ríos utilizando un modelo lineal-plateau, quienes definieron un umbral en 162 kg Nd y superior a los 126 kg de Nd reportados por Ruiz et al. (2004) para siembras tempranas en Entre Ríos sobre suelos similares, aunque estos últimos autores definen este umbral para alcanzar RR de 82%. En otras zonas de la región pampeana se han reportado umbrales mayores (Sánchez y Muñoz 2008; Salvagiotti et al. 2011) también considerando modelos lineal-plateau y el Nd (0-60 suelo + fertilizante) aunque es importante destacar que los rendimientos absolutos obtenidos en esas redes fueron mayores a los encontrados en esta tesis. La respuesta al N estaría afectada por el ambiente productivo (Pagani et al. 2008;

Salvagiotti et al. 2011), más adelante en esta misma sección se discute cómo influye el nivel de rendimiento alcanzado sobre los parámetros del modelo.

A una misma profundidad de muestreo, no hubo diferencias significativas en el valor del umbral (C) entre los diferentes momentos de muestreo (Tabla 2.10), por lo cual no se rechaza la hipótesis planteada en este capítulo “En siembra tardía, los umbrales de respuesta a la fertilización nitrogenada calibrados a partir de la disponibilidad de NO_3 a la siembra y en V6, no difieren debido al corto tiempo que transcurre entre estos dos momentos”. Igualmente se debe considerar que el ajuste de los modelos cuyos muestreos se realizaron en PS son mejores que los ajustes de los modelos cuyos muestreos se realizaron en V6, debido a esto, los resultados de este trabajo sugieren la conveniencia de realizar los muestreos de suelo en PS. Esto es diferente a lo encontrado en el sudeste de la provincia de Buenos Aires para maíces tempranos, donde los modelos de diagnóstico y recomendación de fertilización se basan en análisis de suelo en V6 (Sainz Rozas et al. 2008), esto se debería a que en el sudeste de Buenos Aires las pérdidas de N en el cultivo de maíz temprano bajo siembra directa se producen principalmente en los estadios iniciales del ciclo del cultivo (Sainz Rozas et al. 2004; Barbieri et al. 2010). Los resultados de esta tesis coinciden con lo reportado por otros autores del resto de la región pampeana cuyos modelos realizan la determinación de N en el suelo en PS (Bianchini et al. 2004; Ruiz et al. 2004; Gregoret et al. 2006; Sánchez y Muñoz 2008; Barraco et al. 2015), aunque todos estos modelos corresponden a maíces sembrados en fechas tradicionales. Las ventajas del muestreo de suelo en V6 serían en condiciones de alta pérdida de N por lixiviación o de elevada mineralización (Bock et al. 1992). Sin embargo, los suelos de textura más fina como los de esta tesis tienen menor probabilidad de pérdidas por lixiviación (Pasquin et al. 2012). Probablemente por las características de los experimentos realizados en este trabajo, maíces tardíos en Entre Ríos, debido a la textura que presentan los suelos y a la temperatura que hay desde la emergencia hasta V6 que hace que el desarrollo y crecimiento de las plantas transcurra en un período menor de días, llevó a que no haya diferencias en muestrear el suelo a la siembra o en V6. El mejor ajuste en PS que en V6, podría deberse a que en PS se encontró menor variabilidad de Nd en el suelo entre lotes (Figura 2.10), por tal motivo el R^2 de los modelos que consideran muestreos en PS es mayor que el de los modelos que consideran el muestreo de suelo en V6 (Tabla 2.10). Igualmente es importante remarcar que, a pesar que el umbral en V6 fue mayor que el de PS (Tabla 2.10), como los lotes en V6 presentaron una cantidad mayor de Nd en el suelo (Tabla 2.3), los diferentes modelos generados estarían recomendando aplicar una dosis de N con el fertilizante similar con ambos modelos.

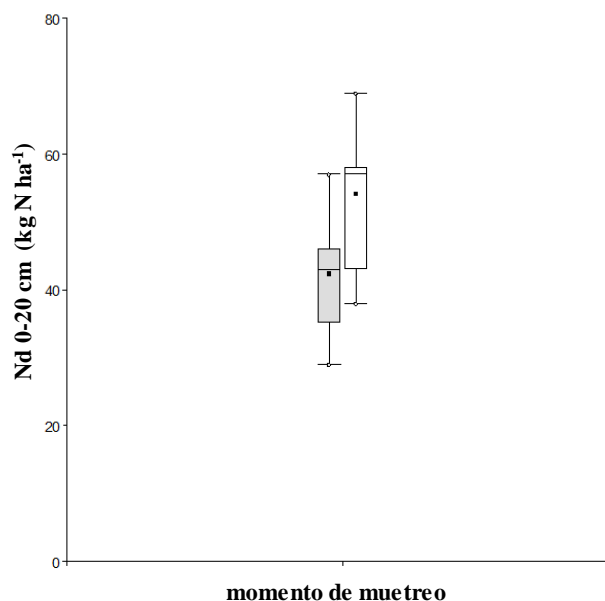


Figura 2.10. Gráfico de cajas para analizar la variabilidad en el Nitrógeno disponible (Nd, suelo (0-20 cm)) en los diferentes lotes según el muestreo se realice en presiembra (PS) (caja gris) o en V6 (caja blanca). Cada gráfico muestra la media (punto dentro de la caja), la mediana o Q2 (50% de los datos) el Q1 (25% de los datos), el Q3 (75% de los datos). Los bigotes marcan valores atípicos.

Al analizar la profundidad de muestreo (Tabla 2.10), se observa que los ajustes de las funciones en un mismo momento, fueron similares independientemente de la misma. En el caso del muestreo en PS que logró un mejor ajuste, el único parámetro que difirió entre las diferentes profundidades fue el umbral crítico ($P=0,001$), i.e. el C se incrementó a medida que se incrementó la profundidad de muestreo, lo cual resulta lógico ya que se considera una mayor profundidad de muestreo y, consecuentemente, la cantidad de N es mayor (Tabla 2.3 y Figura 2.1). Debido a la presencia de horizontes sub-superficiales arcillosos (B2t) que pueden dificultar el muestreo de suelo, se podría entonces recomendar realizar el diagnóstico partiendo de los 20 cm superficiales. La mayoría de los modelos que relacionan el rendimiento o RR con el Nd en la región Pampeana, consideran el dato de Nd (0-60 cm) en PS, sería interesante ver los ajustes para modelos que consideren solamente los primeros 20 cm de suelo en esas mismas redes, lamentablemente los mismos han sido escasamente reportados. Los pocos casos reportados de la relación entre el RR y el Nd que consideran el N en los primeros 20 cm de suelo y utilizan un modelo lineal-plateau, también son en Entre Ríos en maíces sembrados en fecha temprana (Melchiori et al. 1996; Mistrorigo et al. 1997). Barbagelata et al. (2014) con el objetivo de establecer la relación entre el RR del sorgo y el Nd, también evaluaron distintas profundidades de muestreo y observaron una estrecha relación entre el Nd 0-60 cm y el Nd 0-20 cm, llegando a una conclusión similar a la de esta tesis, i.e. que no se mejora la exactitud del modelo por aumentar la profundidad de muestreo. Es por ello que también dichos autores recomiendan la conveniencia de utilizar el modelo que consideren una profundidad de muestreo de 20 cm para el cultivo de sorgo en Entre Ríos, el que comparte un similar ciclo de crecimiento que los maíces tardíos. Esta diferencia respecto a otras regiones puede ser atribuida a la presencia del horizonte B textural que no sólo dificulta la tarea del muestreo, sino que también podría limitar el movimiento rápido de nitratos por el suelo (Berardo 1994).

Uno de los inconvenientes que se plantea al utilizar el RR como variable regresora, es la violación de algún supuesto del análisis de la regresión, aunque este punto de vista es bastante discutido. En las Figuras 2.5 a y b, se puede ver la distribución de los residuales, los residuales fueron mayores en los valores menores de Nd, esto usualmente

ocurre cuando se grafica el rendimiento relativo en función del Nd, con valores bajos de Nd algunos ambientes llegan al 100% de rendimiento y otros no. Salvagiotti et al. (2011) señalan que una ligera desviación en la normalidad de la distribución no sería significativa. Según el teorema de Gauss-Markov, el estimado de mínimos cuadrados ordinarios (que es lo que se utiliza en regresiones lineales simples o múltiples) es el menor estimador lineal y el teorema aplica no importando la distribución de Y (no hace falta normalidad), lo que requiere el supuesto es que la elección del modelo de regresión sea correcta, es decir que no se ajuste una recta si la distribución es bilineal (Rancher y Schaalje 2008). Mas allá de las contradicciones que genera en el ámbito estadístico, también hay que analizar las limitantes desde el punto de vista agronómico-económico. Por un lado, puede generar errores en la interpretación de los resultados de experimentos de fertilización (Alvarez, 2007), ya que no existe un umbral único para todos los ambientes (Figura 2.8), esto constituye una generalización que puede ser útil desde el punto de vista práctico, pero que puede llevar a recomendaciones incorrectas al no considerar distintos potenciales de rendimiento. Por el otro, la información generada pierde utilidad para realizar un análisis económico de la práctica y tomar definiciones en base al retorno económico esperado; es por ello que en algunos casos se termina particionando los resultados de las redes de ensayos según el rendimiento de los diferentes sitios para contrarrestar el problema de la variabilidad entre localidades presentada al inicio de este capítulo. En el presente estudio, se particionaron los sitios en ambientes de menos de 6000 kg ha⁻¹, 6000 a 9000 kg ha⁻¹ y ambientes de más de 9000 kg ha⁻¹ (Tabla 2.11 y Figura 2.8), esta partición es similar a la utilizada por Mistrorigo y Valentinuz (2004) en Entre Ríos, quienes utilizaron rendimientos menores a 5500 kg ha⁻¹, por considerarlo el rendimiento de indiferencia para el maíz en ese entonces, rendimientos entre 5500 y 9000 kg ha⁻¹ por ser el rango de rendimientos más frecuentes para la región y de más de 9000 kg ha⁻¹ como rendimientos máximos para Entre Ríos, si bien estos parámetros se definieron para maíces tempranos, pueden considerarse similares para maíces tardíos. En otros lugares de la región Pampeana que exploran niveles de rendimiento mayor, se ha trabajado con otros rangos de rendimiento (Gregoret et al. 2006; Sánchez y Muñoz 2008; Salvagiotti et al. 2011).

En este trabajo, tanto el umbral crítico (C) como la respuesta al aumento de N (b) y el parámetro a, fueron menores en los ambientes de menor potencial (<6000 kg ha⁻¹) que en los ambientes de 6000 a 9000 kg ha⁻¹ y que en los ambientes de más de 9000 kg ha⁻¹. El valor C, o umbral crítico, fue 9% y 15% mayor para rendimientos de 6000 a 9000 kg ha⁻¹ y de más de 9000 kg ha⁻¹, respectivamente, que en los ambientes de <6000 kg ha⁻¹. Salvagiotti et al. (2011) en el centro y sur de Santa Fe, Sánchez y Ascheri (2005) en el sudeste de Córdoba, y Gregoret et al. (2006) en la región semiárida de Córdoba, también observaron en maíces tempranos que, en ambientes de alto rendimiento, el Nd para alcanzar el plateau es mayor, por lo cual se puede inferir que el potencial del ambiente es un factor determinante del umbral de Nd. Los umbrales observados por dichos autores no son comparables con los de esta tesis, debido a que trabajaron con profundidades de muestreo de 0-60 cm y los rendimientos que exploraron fueron mayores a los explorados en este trabajo. En este trabajo, como indica la Figura 2.9, la diferencia en el rendimiento entre las localidades estaría dada principalmente por el agua disponible en R1. La diferencia entre las localidades que acumularon más de 158 o menos de 158 mm de agua disponible en R1 fue de 3880 kg ha⁻¹, esto coincide con lo reportado con numerosos autores acerca de la importancia del agua en el período crítico para la definición del rendimiento (Andrade et al. 2002; Calviño et al. 2003; Ruiz et al. 2004; Maddoni 2011; Mercau y Otegui 2014; Gambin et al. 2016). En los lotes con déficit hídrico, el factor más importante para la definición del rendimiento estuvo relacionado con la fertilidad

propia de cada sitio, cuando el agua disponible en R1 no fue un factor limitante, el agregado de N como fertilizante resultó indispensable para alcanzar altos rendimientos (Figura 2.9).

En el caso de los modelos para ambientes de 6000-9000 kg ha⁻¹ y los ambientes de más de 9000 kg ha⁻¹, no se observaron diferencias en los parámetros b y C, pero si en el parámetro a (Tabla 2.11 y Figura 2.8), esto indicaría que la respuesta a la fertilización y el umbral para las localidades con rendimientos mayores a 6000 kg ha⁻¹, son similares, lo que cambia es la productividad inicial o potencial de esos ambientes, y esto también estaría relacionado al agua disponible en R1. La Tabla 2.12, muestra distintas medidas estadísticas para el agua disponible en R1 (mm) para las diferentes localidades que fueron particionadas en ambientes de 6000 a 9000 kg ha⁻¹ o en ambientes de más de 9000 kg ha⁻¹, se puede observar que, para todas las medidas, el agua disponible en R1, fue mayor en ambientes de más de 9000 kg ha⁻¹.

Tabla 2.12. Estadística descriptiva para las localidades agrupadas en los distintos ambientes según el agua disponible en R1 (mm): D.E: Desvío estándar; Mín: Mínimo; Max: Máximo; P (25) Percentil 25; P (75) Percentil 75.

Ambiente	Agua disponible en R1 (mm)				
	Media	Mín	Máx	P(25)	P(75)
Más de 9000 kg ha ⁻¹	192	160	239	163	208
6000 a 9000 kg ha ⁻¹	133	102	177	122	132

Los resultados obtenidos en maíces sembrados en fechas tardías en esta tesis, sugieren que la cantidad de N (suelo más fertilizante) a partir de la cual el maíz llega al umbral crítico, no es muy diferente al umbral informado en maíces tempranos. La diferencia entre maíces tempranos y tardíos en cuanto a dosis recomendadas de fertilización nitrogenada, estaría dada por la mayor cantidad de N en el suelo que usualmente se observa a la siembra de los maíces tardíos (Caviglia et al. 2005; Salvagiotti et al. 2014, Gambin et al. 2016, Coyos et al. 2018), por lo cual el N a aplicar con el fertilizante es menor.

2.5. Conclusiones

A partir del conocimiento de la disponibilidad de nitrato en el suelo en PS, se logró ajustar un modelo lineal-plateau que puede ser utilizado como herramienta de diagnóstico para la definición de la dosis de N a aplicar en maíces tardíos en Entre Ríos. No se encontraron mejoras en la predicción del modelo por aumentar la profundidad de muestreo, por lo cual la recomendación es utilizar el modelo que considere el muestreo de los 20 cm superficiales. Para lograr un buen diagnóstico que relacione el Nd con el rendimiento expresado en kg N ha⁻¹, no solo fue necesario contar con el dato del Nd a la siembra, sino también conocer la capacidad de producción del lote, de esta manera se generaron tres modelos que según el ambiente esperado (inferior a 6000 kg ha⁻¹, entre 6000 y 9000 kg ha⁻¹, y para ambientes de más de 9000 kg ha⁻¹) permiten definir la cantidad de N aplicar como fertilizante hasta llegar al umbral.

**Maíz Tardío en Entre Ríos:
Efecto de la fertilización nitrogenada y cambios en la densidad sobre la
Eficiencia Agronómica de Uso del Nitrógeno**

Capítulo 3: Maíz tardío en Entre Ríos: Efecto de la fertilización nitrogenada y cambios en la densidad sobre la Eficiencia Agronómica de Uso del Nitrógeno

3.1. Introducción

La producción de granos es considerada el factor antrópico de mayor efecto sobre el ciclo global del nitrógeno (N) (Liu et al. 2010; Sutton et al. 2013). En los últimos 40 años, la aplicación de N se incrementó siete veces a nivel global, mientras que la producción de alimentos agrícolas se duplicó (Lemaire y Gastal 2009), igualmente existen diferencias significativas entre diferentes países respecto a la dosis de N utilizadas y su eficiencia de uso (Dobermann 2007). Si bien el consumo de N en Argentina se incrementó en 5,5 veces entre 1993 y 2013 (González San Juan et al. 2013), es uno de los países que menos fertilizantes nitrogenados utiliza en la región, aunque con mayor Eficiencia Agronómica de uso del Nitrógeno (EAN) (Austin et al. 2007).

La EAN es un concepto fundamental para evaluar la productividad de los sistemas de cultivos, y el estudio de la misma busca incrementar la productividad de los sistemas minimizando las pérdidas de N (Fixen et al. 2014). Las deficiencias de N generan pérdidas en producción y reducen la eficiencia de uso de otros factores de producción del agroecosistema (tierra, agua, capital, trabajo), pero los excesos de aplicación pueden resultar en pérdidas del nutriente con costos ambientales y sociales significativos para la sociedad (Mosier et al. 2001). Los principales efectos negativos derivados del uso en exceso de los fertilizantes nitrogenados son contaminación de aguas por lixiviación o escorrentía de nitratos, y la contaminación del aire por emisión de gases de efecto invernadero (Cassman et al. 2003). En tal sentido, prácticas de manejo que mejoren la EAN, producen un impacto en los sistemas productivos con implicancias sobre la sustentabilidad (Sutton et al. 2013). La fertilización nitrogenada y el ajuste de la densidad de plantas, son dos prácticas de manejo de relevancia que pueden afectar positivamente el rendimiento (Uhart et al. 1995a; Gambin et al. 2016) y, en consecuencia, la EAN y sus componentes. El análisis individual de la Eficiencia de Recuperación aparente del N (ERN) y la Eficiencia Fisiológica de Uso del N (EFN), permite entender si la práctica de manejo afecta la recuperación del nutriente, la habilidad de la planta en transformar el nutriente en rendimiento o ambas eficiencias (Fixen et al. 2014). La típica curva de respuesta en rendimiento al agregado de N, nos muestra que el rendimiento aumenta al incrementar el N, pero la EAN va disminuyendo por cada unidad de N que se va adicionando, hasta llegar al umbral crítico, donde ya no existe una respuesta al agregado de N (Norton 2014). Es esperable que aplicaciones de N que excedan los requerimientos del cultivo disminuyan la ERN (Ciampitti y Vyn 2012) y la EFN (Muchow 1998; Barbieri et al. 2008). En el caso de la densidad, Ciampitti y Vyn (2011) sugieren que aumentos de la misma tienen un efecto positivo sobre la ERN. Es menos frecuente encontrar información sobre el efecto de la densidad sobre la EFN. Pietrobón (2012), sostiene que los aumentos en la EFN a densidades crecientes pueden deberse a una limitante en el número de destinos a bajas densidades. Sin embargo, no se ha evaluado la magnitud del efecto de la densidad y la fertilización, como también la interacción de estos factores sobre la EAN y sus componentes en maíces tardíos, donde hay una mayor disponibilidad inicial de N en el suelo y un ambiente fototermal que tiende a empeorar en la transición del verano al otoño afectando a la fuente fotosintética para el llenado de granos (Mercau y Otegui 2014). En esta situación, un aumento en la dosis de N podría llevar a escasos incrementos de la EFN y una drástica reducción de la ERN. Por otra parte, un aumento en la densidad de siembra, dentro de un rango agronómico, podría mejorar la EAN por una mayor ERN cuando se incremente la dosis de N.

En este capítulo se aborda el efecto de dos prácticas agronómicas como son la fertilización nitrogenada y cambios en la densidad de plantas sobre la EAN y sus componentes, la ERN y la EFN, en maíces de siembra tardía.

3.2. Materiales y Métodos

3.2.1. Descripción de los experimentos y manejo

En la sección 2.2.1 (Descripción de los experimentos y manejo), se detalla la descripción de los experimentos en microparcels (MP) realizados en Paraná, Victoria y Gualaguaychú que se utilizaron para generar los datos del presente capítulo.

3.2.2. Diseño experimental y tratamientos

El ensayo de Paraná 2011-12 tuvo un diseño en bloques completos aleatorizados (DBCA) con cuatro repeticiones. En este ensayo solo se evaluaron dosis de N: 0, 25, 50, 100 y 150 kg de N ha⁻¹ UAN en V6. Para los análisis realizados en este capítulo, se utilizaron solamente los tratamientos 0, 50 y 150 kg de N ha⁻¹, ya que son los tratamientos en los cuales se recolectaron plantas para realizar análisis de MS y concentración de N. En adelante, estos tratamientos se denominarán como 0N, 50N y 150N, respectivamente.

En los dos experimentos de la segunda campaña (2012-2013), a efectos de evaluar la densidad de plantas sobre la EAN y sus componentes, a la densidad ensayada la primera campaña (70000 plantas ha⁻¹), se agregaron otras dos densidades: 40000 y 100000 plantas ha⁻¹. Las dosis de N utilizadas con estas dos densidades fueron de 0, 50 y 150 kg N ha⁻¹, aplicados de forma similar al ensayo de 2011-12. En este caso el diseño fue en parcelas divididas, siendo la parcela mayor la densidad y la parcela menor la dosis de fertilizante.

3.2.3. Mediciones

3.2.3.1. Muestreos de suelo

La metodología fue explicada en la sección 2.2.3 (Muestreos de suelo).

3.2.3.2. Caracterización nutricional del cultivo

Se procedió a caracterizar el status nutricional del cultivo a través del índice nutricional de N (INN) y el índice de verdor (IV).

3.2.3.2.1. Índice nutricional de nitrógeno (INN)

El INN es la relación entre el contenido de N actual (Na) y el N crítico (Nc) y es otra manera de evaluar el estado nutricional en un momento determinado del cultivo. En cualquier estadio del cultivo, el Nc puede definirse como la concentración mínima requerida para maximizar la tasa de crecimiento del cultivo (Ulrich 1952 citado en Herrmann y Taube 2004). Valores del INN superiores a 1 indican que el N no es limitante, cuanto más alejado mayor es la intensidad del exceso. Valores de 1 o cercanos a 1 indican un estado nutricional óptimo y valores inferiores a 1 indican que la situación es de déficit de N y cuanto más cercano al 0, mayor será la situación de deficiencia. Para el cálculo del Nc y el INN, se utilizó el modelo propuesto por Herrmann y Taube (2004) (ec. 3.1 y 3.2), que explora estadios de cultivo más avanzados que los explorados por Lemaire y Gastal (2009).

$$Nc = 34,12 \times MS_{total}^{-0,391} \quad (ec. 3.1)$$

$$INN = (\% N \text{ en planta} / N \text{ Crítico}) \quad (ec. 3.2)$$

Donde:

N_c es el N crítico

MS total es la MS planta entera (0% H)

3.2.3.2.2. Índice de verdor (IV)

El IV está asociado al contenido de clorofila, que a su vez está asociado a la concentración de N en hoja (Pagani et al. 2009). Se utilizó el medidor de clorofila Minolta SPAD 502 (Spectrum Technology Inc.), metodología similar a la utilizada por Blackmer y Schepers (1995), para realizar evaluaciones en los estadíos de V10 y en R3 según la escala de Ritchie y Hanway (1982). El IV se determinó en la última hoja desplegada, en la evaluación de V10, y en la hoja de la espiga en el caso de la evaluación en R3. En cada momento se hicieron 3 lecturas por hoja en 10 plantas sucesivas por parcela, en el análisis de la información se trabajó con un valor promedio por cada unidad experimental.

3.2.3.3. Radiación interceptada (Ri)

En R1, se evaluó el % de Ri a través de la medición de la radiación fotosintéticamente activa incidente por sobre y por debajo del estrato de hojas verdes, utilizando un sensor lineal cuántico, según la metodología de Gallo y Daughtry (1986). El porcentaje de la radiación incidente (%Ri) se expresó como:

$$\%Ri = 100 \left((1 - (I_t/I_0)) \right) \quad (\text{ec. 3.3})$$

donde I_t es la radiación incidente debajo de la última hoja verde y I_0 es la radiación incidente por encima del canopeo. Las mediciones se tomaron en días sin nubes, alrededor del mediodía (12:00 hs \pm 1 hora). En cada unidad experimental se registró una lectura sobre el canopeo e inmediatamente 4 lecturas debajo de la última hoja verde. En los análisis se trabajó con un valor promedio para cada unidad experimental.

3.2.3.4. Hojas verdes a madurez fisiológica

La senescencia foliar representa un período degenerativo que conduce a la muerte (Leopold 1975). El progreso de la senescencia foliar durante el período de llenado de granos puede variar como resultado del stress por N. En maíces, la senescencia puede ser pensada como una limitación a la productividad del cultivo (Valentinuz y Tollenaar 2005). En R6 se evaluó el número de hojas verdes por debajo de la espiga, una hoja se consideró senescente, cuando la mitad o más de la mitad de esta, presente color amarillento (Maddonni y Otegui 1996). En los análisis se trabajó con el valor promedio de 10 plantas sucesivas por unidad experimental.

3.2.3.5. Producción de materia seca (MS) y componentes de rendimiento

Una vez que el maíz llegó a R6, en los tratamientos N0, N50 y N150, se procedió a cortar, al ras del suelo, cuatro plantas sucesivas por parcela evitando las dos hileras centrales, para determinar peso seco. Se separó el grano del resto de la planta: marlo, tallo y hojas. Cada fracción individual se secó en estufa a 65°C con circulación forzada hasta peso constante. Se pesó por separado el grano del resto de la planta. La producción de MS se expresó por unidad de área para cada fracción, *i.e.* MS grano, MS resto y MS total. Con estos valores se procedió a calcular el índice de cosecha (IC) y el peso de mil granos.

3.2.3.6. N acumulado en materia seca y partición

Las muestras utilizadas para calcular MS (punto 3.2.3.5), se molieron y homogeneizaron. Cada muestra completa se pasó por un molino Wiley con malla de 1 mm, de donde se obtuvieron 150 g para realizar los análisis de concentración de N. El análisis de la concentración de N se realizó por macro Kjeldahl. El N total de cada

fracción, se calculó multiplicando la concentración de N por la MS. Con estos valores se procedió a calcular el índice de cosecha del N (ICN).

3.2.3.7. Estimación de índices de eficiencia

El análisis de la EAN y sus componentes (ERN y EFN) se realizó según Dobermann (2007), Ciampitti y Vyn (2012) y Fixen et al. (2014), y también se estimó la productividad parcial del factor N (PPF_N) (Dobermann 2007; Fixen et al. 2014):

Eficiencia Agronómica del uso del N:

$$EAN = \frac{\Delta \text{ kg maíz}}{\Delta \text{ kg N absorbido}} * \frac{\Delta \text{ kg N absorbido}}{\Delta \text{ kg N aplicado}} = \frac{\Delta \text{ kg maíz}}{\Delta \text{ kg N aplicado}} \quad (ec. 3.4)$$

Eficiencia Fisiológica de uso del N:

$$EFN = \frac{\Delta \text{ kg maíz}}{\Delta \text{ kg N absorbido}} \quad (ec. 3.5)$$

Eficiencia de Recuperación aparente del N:

$$ERN = \frac{\Delta \text{ kg N absorbido}}{\Delta \text{ kg N aplicado}} \quad (ec. 3.6)$$

Productividad Parcial del Factor N:

$$PPF_N = \frac{\text{Rendimiento}}{\text{kg N aplicado}} \quad (ec. 3.7)$$

donde:

Δ kg maíz es la diferencia de rendimiento ($H=0\%$) entre el tratamiento fertilizado y el control.

Δ N absorbido es la diferencia de N en planta entre el tratamiento fertilizado y el control.

Δ N aplicado es la diferencia de N agregado como fertilizante entre los tratamientos fertilizados y el control.

Se evaluó la variación en la EAN, sus componentes y el PPF_N a través de cambios en la disponibilidad de N (0, 50 y 150 kg N ha^{-1} agregados como fertilizante). En el caso del segundo año, también se analizó el efecto de densidades contrastantes sobre dichos índices (40000, 70000 y 100000 plantas ha^{-1}).

3.2.4. Análisis estadístico

El efecto de los tratamientos y sus interacciones fue evaluado a través del ANOVA usando modelos lineales y generales mixtos. En el caso del diseño en bloques completamente aleatorizado, donde solamente se evaluaron dosis de N, se consideró la localidad y dosis de fertilizante como efectos fijos y el bloque como efecto aleatorio. En el caso del diseño de parcelas divididas en bloques completamente aleatorizados, donde se evaluaron densidades y dosis de N, se consideraron efectos fijos la localidad, densidad y dosis de fertilizante. Fueron considerados efectos aleatorios los bloques y la parcela principal. Cuando el análisis de los efectos principales fue significativo y no existieron

interacciones significativas, se procedió a analizar dichos efectos a través del test de diferencias mínimas significativas (LSD de Fischer), considerando una significancia del 5%.

3.3. Resultados

Se procedió a caracterizar los diferentes sitios donde se realizaron los ensayos. La presentación de los resultados se realizó en función del efecto de la dosis de N sobre el status nutricional del cultivo, el %Ri, el número de hojas verdes, la acumulación de MS y componentes del rendimiento, la acumulación de N en planta y el efecto sobre la EAN y sus componentes. Posteriormente, y siguiendo el mismo orden, se analizó el efecto de la densidad, el agregado de N y la interacción de estos factores para las mismas variables en los ensayos de la campaña 2012-2013. Los resultados se analizaron en ese orden debido a que en la primera campaña no se incluyeron distintas densidades como tratamientos.

3.3.1. Caracterización de los sitios

Los 3 sitios donde se realizaron los experimentos fueron descriptos en la sección 2.3.1. (Caracterización de los sitios). Las Tablas 2.1 y 2.3, muestran datos de fertilidad de suelo para los ensayos de microparcels realizados en Paraná, Victoria y Gualaguaychú. Los valores para P-Bray I, S-SO₄, materia orgánica y pH están dentro del rango de valores usualmente encontrados en Entre Ríos (Tabla 2.1). La cantidad de N-nitrato, para cada sitio en los momentos de PS y V6, son representativos de lo observado en la zona en siembras tardías (Tabla 2.3).

A pesar que en los tres sitios el agua disponible en el suelo fue similar en PS, las precipitaciones posteriores a la misma fueron contrastantes, y se puede caracterizar la campaña 2011-2012 como una campaña húmeda y la campaña 2012-2013 como seca (Tabla 2.2). Se puede observar que en Paraná llovieron 695 mm entre siembra-MF y 249 mm durante el período crítico (R1 \pm 15 días), mientras que los registros de Gualaguaychú y Victoria fueron de 453 y 300 mm para el período entre siembra-MF y de 75 y 101 mm durante el período crítico, respectivamente.

3.3.2. Efecto de la fertilización con N sobre las diferentes variables

3.3.2.1. Caracterización nutricional del cultivo

3.3.2.1.1. Índice nutricional de nitrógeno (INN)

Se analizó el INN para caracterizar el estado nutricional del cultivo en las diferentes localidades según la dosis de N aplicada (Tabla 3.1). El INN fue afectado tanto por la localidad ($P=0,0006$) como por la dosis de N aplicada ($P<0,0001$) y no hubo interacción entre ambos factores. Paraná se diferenció de Gualaguaychú y Victoria y no hubo diferencias entre estas dos localidades, el INN fue mayor en Paraná que en las otras dos localidades, aunque en ninguna de las tres localidades se alcanzó el Nc, aún en los tratamientos con mayores dosis de N. La fertilización nitrogenada afectó positivamente el INN, con mayores dosis de fertilización se alcanzaron valores de INN más cercanos al Nc.

Tabla 3.1. Índice nutricional de nitrógeno (INN) a madurez fisiológica (MF) y el índice de verdor (IV) en los estadíos de V10 y R3 para las diferentes localidades y dosis de fertilizante aplicado.

	INN (MF)	Índice de Verdor (V10)	Índice de Verdor (R3)
Localidad			
Paraná	0,86 A	57 A	59 A
Victoria	0,73 B	53 B	54 B
Gualeguaychú	0,72 B	53 B	53 B
Dosis de N (kg ha ⁻¹)			
150	0,89 A	56 A	58 A
50	0,78 B	55 A	56 B
0	0,65 C	53 B	52 C
ANOVA		valor P	
Modelo	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Localidad (Loc)	0,0006	<0,0001	<0,0001
Dosis de N (N)	<0,0001	0,0132	<0,0001
Loc x N	0,2679	0,8961	0,3223

Medias acompañadas con una letra común no son significativamente diferentes según test LSD ($\alpha=0,05$)

3.3.2.1.2. Índice de verdor (IV)

En ambos momentos de evaluación se observó respuesta al agregado de N en el IV (Tabla 3.1). En el estadío vegetativo, no hubo diferencia entre tratamientos fertilizados, pero si entre estos y el control, los tratamientos fertilizados presentaron mayores IV ($P=0,0132$). En R3, no sólo se observó diferencia entre los tratamientos fertilizados y el control, sino también entre dosis de fertilizante ($P<0,0001$), a medida que aumentamos la dosis de fertilizante, aumenta el IV. En ambos momentos se observaron diferencias entre localidades, en Paraná el IV fue mayor que en Victoria y Gualeguaychú.

3.3.2.2. Radiación interceptada (Ri)

La fertilización con N afectó el Ri en R1($P=0,017$) (Tabla 3.2). Los tratamientos fertilizados se diferenciaron del control ($Ri=79\%$), pero no se observaron diferencias en la Ri interceptada entre los tratamientos fertilizados, el N produjo aumentos en la Ri. Entre localidades, Paraná y Victoria se diferenciaron de Gualeguaychú.

Tabla 3.2. Análisis de varianza para el % de Radiación interceptada (Ri) en R1 y número hojas verdes a madurez fisiológica en función de la dosis de N aplicada.

	Ri	Hojas Verdes
	(%)	(número)
Localidad		
Paraná	86 A	3.1 A
Victoria	85 A	3.0 A
Guaileguaychú	73 B	2.0 B
Dosis de N		
(kg ha ⁻¹)		
150	83 A	3.4 A
50	83 A	2.8 B
0	79 B	1.9 C
ANOVA	valor P	
Modelo	<0,0001	<0,0001
Localidad (Loc)	<0,0001	<0,0001
Dosis de N (N)	0,0170	<0,0001
Loc x N	0,9421	0,3169

Medias acompañadas con una letra común no son significativamente diferentes según test LSD ($\alpha=0,05$)

3.3.2.3. Hojas verdes a madurez fisiológica

La fertilización afectó el número de hojas verdes a madurez fisiológica de cada tratamiento ($P<0,0001$), el número de hojas verdes aumento con el agregado de N (Tabla 3.2). En el caso de las localidades, también hubo diferencias en el número de hojas verdes a madurez fisiológica.

3.3.2.4. Producción de materia seca (MS) y componentes de rendimiento

En la Tabla 3.3 se observa el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la producción de MS total, MS grano y MS resto, el peso de mil granos (PMG) y el IC, en los 3 experimentos. Se puede observar que hubo diferencias entre localidades para todas las variables analizadas.

Tabla 3.3. Materia seca acumulada en rastrojo (MS resto), grano (MS grano) y total (MS total), peso de mil granos (PMG) e índice de cosecha (IC) en función de la dosis de N aplicada. E.E: Error Estándar.

	MS resto		MS grano		MS total		PMG		IC	
	Promedio (kg ha ⁻¹)	E.E	Promedio (kg ha ⁻¹)	E.E	Promedio (kg ha ⁻¹)	E.E	Promedio (g)	E.E	Promedio (%)	E.E
Localidad										
Paraná	6977 B	403	9180 A	198	16157 A	484	290 A	4,8	56 A	1
Victoria	8845 A	403	6780 B	198	15625 A	484	220 B	4,8	44 B	1
Gualeguaychú	6409 B	403	4995 C	198	11404 B	484	183 C	4,8	44 B	1
Dosis de N (kg ha ⁻¹)										
150	7891 A	403	8007 A	198	15898 A	484	238 A	4,8	50 A	1
50	7652 A	403	7121 B	198	14733 A	484	233 AB	4,8	48 A	1
0	6661 A	403	5828 C	198	12489 B	484	221 B	4,8	47 A	1
ANOVA	valor P									
Modelo	0,0335		<0,0001		<0,0001		<0,0001		<0,0001	
Localidad (Loc)	0,0006		<0,0001		<0,0001		<0,0001		<0,0001	
Dosis de N (N)	0,0894		<0,0001		0,002		0,0397		0,0637	
Loc x N	0,9923		0,5466		0,9161		0,3514		0,5636	

Medias acompañadas con una letra común no son significativamente diferentes según test LSD ($\alpha=0,05$)

La aplicación de N incrementó la MS grano y la MS total, pero no afectó significativamente la MS resto ($P=0,0894$). Al aplicar 150 kg N ha⁻¹ se produjo un incremento de la MS grano del 37% respecto al tratamiento no fertilizado. La dosis de 50 kg de N ha⁻¹ produjo un incremento de la MS grano del 22%, también se observaron diferencias entre las distintas dosis de N, estas fueron del 12%. En el caso de la MS total, se diferenciaron los tratamientos que recibieron N respecto al testigo, el agregado de N produjo incrementos de la MS total de 18% y 27% para el agregado de 50 y 150 kg N ha⁻¹. En el caso del PMG, la aplicación de 150 kg N ha⁻¹ produjo un incremento del 8% respecto al control. El IC no fue afectado por el agregado de N.

3.3.2.5. N acumulado en materia seca y partición

Se observaron diferencias significativas entre localidades en el N total, N grano y N resto, al igual que el índice de cosecha del N (ICN) (Tabla 3.4).

Tabla 3.4. Efecto de la dosis de N sobre el N acumulado en el rastrojo (N resto), grano (N grano) y total (N total) y el índice de cosecha del nitrógeno (ICN) en función del N aplicado. E.E: Error Estándar.

	N resto		N grano		N total		ICN	
	Promedio (kg ha ⁻¹)	E.E	Promedio (kg ha ⁻¹)	E.E	Promedio (kg ha ⁻¹)	E.E	Promedio (%)	E.E
Localidad								
Paraná	47 B	3,3	111 A	2,9	158 A	4,7	70 A	2
Victoria	57 A	3,3	77 B	2,9	135 B	4,7	57 B	2
Guauguaychú	45 B	3,3	64 C	2,9	109 C	4,7	59 B	2
Dosis de N (kg ha ⁻¹)								
150	57 A	3,3	105 A	2,9	162 A	4,7	65 A	2
50	51 A	3,3	86 B	2,9	137 B	4,7	62 A	2
0	41 B	3,3	61 C	2,9	102 C	4,7	60 A	2
ANOVA								
	valor P							
Modelo	<0,0001		<0,0001		<0,0001		0,0008	
Localidad (Loc)	0,0279		<0,0001		<0,0001		<0,0001	
Dosis de N (N)	0,0094		<0,0001		<0,0001		0,0717	
Loc x N	0,8727		0,5033		0,5291		0,7828	

Medias acompañadas con una letra común no son significativamente diferentes según test LSD ($\alpha=0,05$)

Ambas dosis de fertilizante produjeron incrementos estadísticamente significativos respecto al testigo en el N acumulado en resto, grano y total (Tabla 3.4). El contenido de N resto, aumento un 24% al agregar 50 kg N ha⁻¹ y 39% con la aplicación de 150 kg N ha⁻¹, las diferencias entre dosis (15%) no fueron estadísticamente significativas. En el caso del N acumulado en grano y del N total, se observaron diferencias significativas incluso entre los tratamientos fertilizados. En el caso del contenido de N en grano, las diferencias porcentuales observadas fueron mayores que para el N resto: 41% al aplicar 50 kg N ha⁻¹ y 72% con la aplicación de 150 kg N ha⁻¹, respecto al contenido de N acumulado en el testigo. El ICN, relación entre el N exportado en grano en función del N total capturado por la biomasa aérea, fue similar entre tratamientos ($P>0,05$).

3.3.2.6. Índices de eficiencia en el uso del N

Los resultados presentados en la Tabla 3.5, muestran que tanto la EAN como la ERN fueron afectadas por la dosis de fertilizante ($P<0,05$). A medida que se incrementó la dosis de N, la EAN y la ERN disminuyeron, 50% la EAN y 61% la ERN. No hubo diferencias significativas en la EFN por efecto de la dosis de fertilizante aplicado. No hubo efectos de localidad en EAN, ERN y EFN.

Tabla 3.5. Eficiencia agronómica de uso del nitrógeno (EAN) y sus componentes; la eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN) y la eficiencia fisiológica del nitrógeno (EFN); junto con la productividad parcial del factor N (PPF_N) en función de la dosis de N aplicado como fertilizante.

	EAN	ERN	EFN	PPF _N
	(kg grano kg N aplicado ⁻¹)	(kg N absorbido kg N aplicado ⁻¹)	(kg grano kg N absorbido ⁻¹)	(kg grano kg N aplicado ⁻¹)
Localidad				
Paraná	22,33 A	0,62 A	35,86 A	128,17 A
Victoria	24,69 A	0,69 A	35,11 A	94,47 B
Guauguaychú	23,14 A	0,50 A	46,29 A	71,06 C
Dosis de N (kg ha ⁻¹)				
50	31,64 A	0,74 A	42,76 A	142,42 A
150	15,87 B	0,45 B	35,42 A	53,38 B
ANOVA		valor P		
Modelo	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Localidad (Loc)	0,7664	0,3442	0,3257	<0,0001
Dosis de N (N)	0,0029	0,0135	0,3074	<0,0001
Loc x N	0,2972	0,5054	0,4167	<0,0001

Medias acompañadas con una letra común no son significativamente diferentes según test LSD ($\alpha=0,05$)

En el caso de la PPF_N, se observó que la interacción localidad x dosis de N fue significativa ($P<0,0001$) (Tabla 3.5), esta se debió a que la respuesta observada en cada localidad fue diferente al pasar de 50 a 150 kg N ha⁻¹, a pesar de que para las tres localidades la dosis menor se diferenció significativamente de la dosis mayor (Figura 3.1).

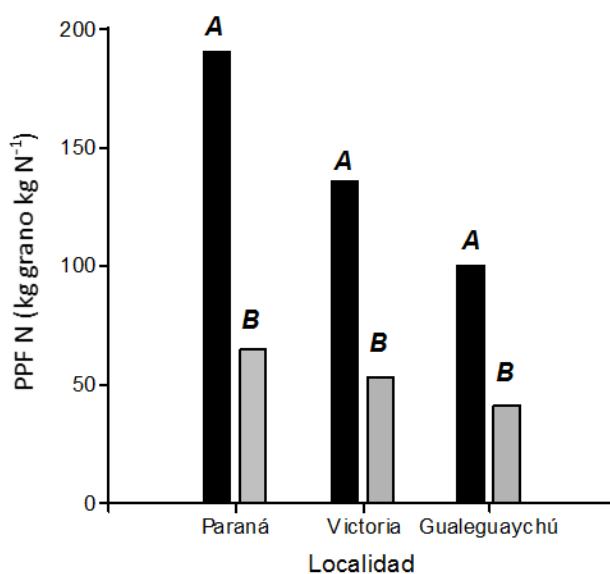


Figura 3.1. Productividad parcial del factor N (PPF_N) para las 3 localidades en función de la dosis de N aplicado: 50 kg N ha⁻¹ (barras negras) y 150 kg N ha⁻¹ (barras grises). Letras diferentes expresan diferencias significativas en la respuesta al N para una misma localidad.

3.3.3. Efecto de la densidad y la fertilización N sobre las diferentes variables

3.3.3.1. Caracterización nutricional del cultivo

3.3.3.1.1. Índice nutricional de nitrógeno (INN)

En los ensayos realizados en Victoria y Gualeguaychú durante la campaña 2012-2013, el INN fue afectado por la fertilización nitrogenada y por la densidad. A medida que aumentó la fertilización nitrogenada se incrementó el INN del cultivo. En el caso de la densidad se observaron diferencias significativas entre la densidad de 100000 plantas ha^{-1} , y las otras dos densidades menores, el INN fue mayor en la densidad de 100000 plantas ha^{-1} . No hubo diferencias en el INN entre localidades (Tabla 3.6).

Tabla 3.6. Análisis de la varianza para el índice nutricional de nitrógeno (INN) a madurez fisiológica (MF) y el índice de verdor (IV) en los estadíos de V10 y R3 para las diferentes localidades, dosis de fertilizante y densidades.

	INN (MF)	Índice de Verdor (V10)	Índice de Verdor (R3)
Localidad			
Victoria	0,75 A	53 A	53 A
Gualeguaychú	0,74 A	54 A	53 A
Densidad plantas ha^{-1}			
100000	0,78 A	51 C	49 C
70000	0,73 B	53 B	54 B
40000	0,73 B	55 A	57 A
Dosis de N kg ha^{-1}			
150	0,83 A	54 A	55 A
50	0,75 B	53 AB	53 B
0	0,66 C	52 B	50 C
ANOVA	valor P		
Modelo	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Localidad (Loc)	0,6395	0,0822	0,3087
Densidad (D)	0,015	0,0019	0,0001
Dosis de N (N)	<0,0001	0,0065	<0,0001
Loc x D	0,6944	0,2814	0,7304
Loc x N	0,0563	0,6157	0,1260
D x N	0,1434	0,5103	0,1185
Loc x D x N	0,6184	0,4894	0,6617

Medias acompañadas con una letra común no son significativamente diferentes según test LSD ($\alpha=0,05$)

3.3.3.1.2. Índice de verdor (IV)

En ambos momentos evaluados, el IV fue afectado tanto por la densidad como por el N aplicado (Tabla 3.6). En el estadío vegetativo (V10), hubo diferencias significativas entre las 3 densidades ($P=0,0019$), a medida que se aumentó la densidad disminuyó el IV. En el caso del N, solamente se observaron diferencias estadísticamente significativas entre el tratamiento 150N y 0N ($P=0,0065$).

En R3 las diferencias de IV entre tratamientos se incrementaron con respecto a V10. En el caso de la densidad, se mantuvieron las diferencias significativas entre las tres densidades ($P=0,0001$). A diferencia de lo observado en el estadio vegetativo, en R3 existieron diferencias estadísticamente significativas entre los dos tratamientos que recibieron N (150N vs 50N). El efecto de las densidades sobre el IV fue opuesto a lo observado entre las densidades y el INN, es decir que a medida que se incrementó la densidad se redujo el IV mientras que el INN aumentó (Tabla 3.6).

3.3.3.2. Radiación interceptada (Ri)

Al analizar los datos de los experimentos de la campaña 2012-2013 no se observó efecto de la dosis de N aplicado sobre la Ri ($P=0,2668$) (Tabla 3.7). Esto es diferente a lo que se observó cuando se analizaron datos de las dos campañas (Tabla 3.7).

Tabla 3.7. Análisis de varianza para el % de Radiación interceptada (Ri) en R1 y el número hojas verdes a madurez fisiológica en función de la dosis de N aplicada y la densidad.

	Ri	Hojas Verdes
	(%)	(Número)
Localidad		
Victoria	82 A	2,8 A
Gualeguaychú	75 B	2,8 A
Densidad (plantas ha ⁻¹)		
100000	85 A	2,0 C
70000	76 B	3,0 B
40000	74 B	3,6 A
Dosis de N (kg ha ⁻¹)		
150	79 A	3,4 A
50	79 A	2,9 B
0	77 A	2,3 C
ANOVA	valor P	
Modelo	<0,0001	<0,0001
Localidad (Loc)	<0,0001	0,6367
Densidad (D)	0,0007	<0,0001
Dosis de N (N)	0,2668	<0,0001
Loc x D	0,5037	0,8516
Loc x N	0,7716	0,0071
D x N	0,1748	0,0012
Loc x D x N	0,5736	0,3468

Medias acompañadas con una letra común no son significativamente diferentes según test LSD ($\alpha=0,05$)

La densidad afectó la Ri ($P=0,0019$), donde se observó que la densidad más alta logró interceptar 85% de la R1 y se diferenció de la Ri que se logró captar con las otras densidades que estuvieron por debajo del 80% (Tabla 3.7).

3.3.3.3. Hojas verdes en madurez fisiológica

Se registró interacción significativa ($P=0,003$) entre la densidad y el agregado de N sobre el número de hojas verdes por debajo de la espiga, la tendencia fue que al aumentar el N se observaron más hojas verdes. En la densidad más baja se observó que la aplicación de N produjo un incremento de HV respecto al control y que no hubo diferencia entre los tratamientos con aplicación de N. En la densidad media también se observaron diferencias entre tratamientos fertilizados, al aumentar la dosis de N aplicado se contabilizaron más hojas verdes. En la densidad de 100000 plantas ha^{-1} , la dosis de 150 kg N ha^{-1} se diferenció de los otros dos tratamientos (Figura 3.2).

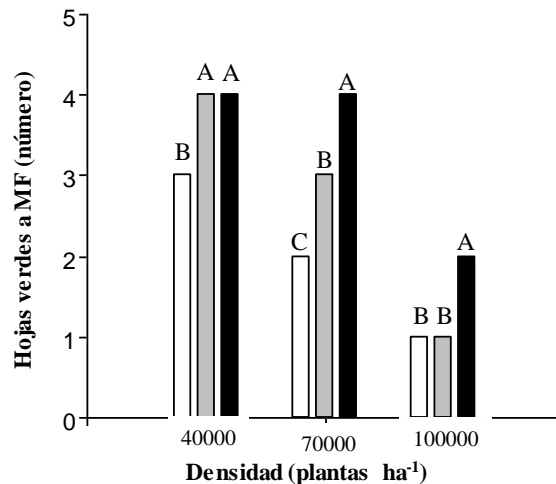


Figura 3.2. Variación en el número de hojas verdes a madurez fisiológica (MF) por debajo de la espiga, para tres densidades diferentes: 40000 plantas ha^{-1} , 70000 plantas ha^{-1} y 100000 plantas ha^{-1} , al variar las dosis de N. Las barras blancas, grises y negras representan las dosis de 0, 50 y 150 kg N ha^{-1} respectivamente, para cada una de las tres densidades. Para una misma densidad, medias acompañadas de letras diferentes indican diferencias significativas entre dosis de N según test LSD ($\alpha=0.05$).

3.3.3.4. Producción de materia seca (MS) y componentes de rendimiento

A excepción del IC, en todas las demás variables hubo diferencias significativas entre las dos localidades. Para todas las variables, los valores registrados en Victoria fueron mayores a los de Gualaguaychú (Tabla 3.8).

La cantidad de MS resto fue afectada tanto por la densidad como por la fertilización, en el caso de la fertilización se diferenció la dosis de 150 kg N ha^{-1} del testigo sin aplicar, siendo la diferencia de 1479 kg ha^{-1} (22%). En el caso de la densidad, las diferencias fueron entre las densidades extremas, donde la diferencia fue de 2252 kg ha^{-1} (34%) (Tabla 3.8). La MS grano, también fue afectado por la densidad y dosis de fertilización. En el caso de las densidades, al igual que en la MS resto, sólo se observaron diferencias entre las densidades de 100000 y 40000 plantas ha^{-1} , a favor de la densidad más alta. En cambio, la fertilización produjo diferencias significativas incluso entre las diferentes dosis de N aplicado, de un casi 14% a favor de las dosis de 150 kg ha^{-1} , en comparación de la dosis de 50 kg ha^{-1} . (Tabla 3.8).

Tabla 3.8. Materia seca acumulada en rastrojo (MS resto), grano (MS grano) y total (MS total), peso de mil granos (PMG) e índice de cosecha (IC) en función de la dosis de N aplicada y la densidad para dos localidades. E.E: error Estándar.

	MS resto		MS grano		MS total		PMG		IC	
	Promedio	E.E	Promedio	E.E	Promedio	E.E	Promedio	E.E	Promedio	E.E
	(kg ha ⁻¹)		(kg ha ⁻¹)		(kg ha ⁻¹)		(g)		(%)	
Localidad										
Victoria	8833 A	286	6612 A	160	15446 A	331	211 A	2,9	43 A	1
Gualeguaychú	6439 B	286	5207 B	160	11647 B	331	181 B	2,9	45 A	1
Dosis de N										
(kg ha ⁻¹)										
150	8310 A	371	6832 A	187	15143 A	406	205 A	3,6	45 A	1
50	7768 AB	371	5998 B	187	13767 B	406	197 AB	3,6	43 AB	1
0	6831 B	371	4900 C	187	11731 C	406	186 B	3,6	42 B	1
Densidad										
(plantas ha ⁻¹)										
100000	8777 A	371	6627 A	222	15404 A	406	179 A	3,6	43 A	1
70000	7607 AB	371	5888 AB	222	13495 B	406	201 B	3,6	44 A	1
40000	6525 B	371	5215 B	222	11740 C	406	207 B	3,6	44 A	1
ANOVA	valor P									
Modelo	<0,0001		<0,0001		<0,0001		<0,0001		<0,0001	
Localidad (Loc)	<0,0001		<0,0001		<0,0001		<0,0001		0,1538	
Densidad (D)	0,0137		0,0123		0,0023		<0,0001		0,9080	
Dosis de N (N)	0,0191		<0,0001		<0,0001		0,0266		0,0116	
Loc x D	0,9889		0,3617		0,7795		0,3887		0,4313	
Loc x N	0,4340		0,8453		0,4298		0,1432		0,4324	
D x N	0,0641		0,1932		0,0232		0,5588		0,2320	
Loc x D x N	0,0972		0,8432		0,0875		0,5705		0,0869	

Medias acompañadas con una letra común no son significativamente diferentes según test LSD ($\alpha=0,05$)

Se observó un efecto significativo ($P=0,0232$) de la interacción densidad y N sobre la MS total (Figura 3.3). En la densidad más baja (40000 plantas ha⁻¹), el agregado de fertilizante no produjo incrementos en la MS total. En las densidades media y superior, el agregado de fertilizante produjo un incremento de la MS respecto al testigo, pero no se encontraron diferencias entre dosis de fertilizante. En la densidad de 70000 plantas ha⁻¹, la dosis de 50 kg N ha⁻¹ produjo incrementos del 21%, y la dosis de 150 kg N ha⁻¹ del 34% respecto a N0. En la densidad de 100000 plantas ha⁻¹, los incrementos fueron del 30% y 46% para las dosis de 50 y 150 kg N ha⁻¹ respecto a N0.

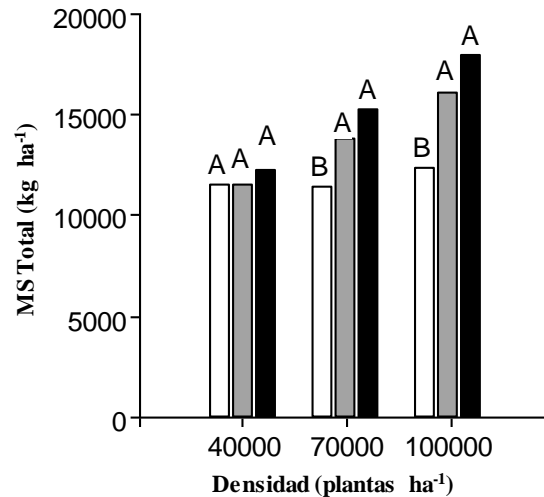


Figura 3.3. Variación de la materia seca total (MS Total) para las diferentes densidades (plantas ha⁻¹) en función de diferentes dosis de N aplicado: 0 kg N ha⁻¹ (barras blancas), 50 kg N ha⁻¹ (barras grises) y 150 kg N ha⁻¹ (barras negras). Letras diferentes expresan diferencias significativas en la respuesta al N para una misma densidad.

El PMG también fue afectado por la densidad y el N, pero en el caso de la densidad, a diferencia de los que pasó con las demás variables, la mayor densidad presentó menores valores de PMG que las otras densidades. En el caso del N aplicado con el fertilizante, se observaron diferencias entre la dosis de 150 kg ha⁻¹ y el testigo. El IC no fue afectado por la densidad, pero si lo fue por el N aplicado ($P=0,0116$), se observaron diferencias significativas entre la dosis de 150 kg ha⁻¹ y el testigo sin fertilizar, el IC aumento de 42% a 45%.

3.3.3.5. N acumulado en materia seca y partición

El N resto y el N total se vieron afectados por la densidad y el agregado de fertilizante. En el caso del N grano, se registró una interacción N x D.

En la Tabla 3.9, se puede observar que la fertilización aumentó el N acumulado en resto y N total, e incluso hubo diferencias en el N acumulado entre dosis de N aplicado. El tratamiento 150N acumulo un 15% más de N resto que el tratamiento 50N y 44% respecto al tratamiento 0N. En el caso del N total, las diferencias fueron aún mayores, 18% sobre 50N y 47% sobre 0N. La densidad más alta (100000 plantas ha⁻¹) se diferenció de las otras dos densidades. En la densidad de 100000 plantas ha⁻¹ se observaron aumentos en el contenido de N resto del 40% respecto a la densidad baja y del 24% respecto a la densidad media. El contenido de N total aumento un 27% respecto a la densidad baja y un 16% respecto a la densidad media.

Tabla 3.9. Efecto de la dosis de N y la densidad sobre el N acumulado en el rastrojo (N resto), grano (N grano) y total (N total) y el índice de cosecha del nitrógeno (ICN) en función del N aplicado y la densidad de plantas. E.E: Error Estándar.

	N resto		N grano		N total		ICN	
	Promedio (kg ha ⁻¹)	E.E	Promedio (kg ha ⁻¹)	E.E	Promedio (kg ha ⁻¹)	E.E	Promedio (%)	E.E
Localidad								
Victoria	58 A	2,4	78 A	1,9	136 A	3,2	57 A	1
Gualeguaychú	48 B	2,4	65 B	1,9	114 B	3,2	57 A	1
Dosis de N (kg ha ⁻¹)								
150	62 A	2,9	86 A	2,3	149 A	3,9	58 A	1
50	54 B	2,9	72 B	2,3	126 B	3,9	57 A	1
0	44 C	2,9	57 C	2,3	101 C	3,9	56 A	1
Densidad (plantas ha ⁻¹)								
100000	63 A	2,9	78 A	2,6	141 A	3,9	55 A	1
70000	51 B	2,9	71 AB	2,6	122 B	3,9	58 A	1
40000	45 B	2,9	66 B	2,6	111 B	3,9	59 A	1
ANOVA	valor P							
Modelo	<0,0001		<0,0001		<0,0001		<0,0001	
Localidad (Loc)	0,0061		<0,0001		<0,0001		0,9374	
Densidad (D)	0,0125		0,0455		0,0044		0,2267	
Dosis de N (N)	0,0003		<0,0001		<0,0001		0,3096	
Loc x D	0,7955		0,9358		0,7799		0,4722	
Loc x N	0,1254		0,2946		0,0642		0,5673	
D x N	0,1817		0,0148		0,0629		0,1754	
Loc x D x N	0,3101		0,8061		0,3707		0,3127	

Medias acompañadas con una letra común no son significativamente diferentes según test LSD ($\alpha=0,05$)

En el caso del N acumulado en el grano, la interacción entre los factores densidad y dosis de fertilizante fue significativa. En la densidad de 40000 plantas ha⁻¹ se observaron diferencias entre la dosis de 150 kg ha⁻¹ y el testigo. En las densidades de 70000 y 100000 plantas ha⁻¹, el contenido de N en grano fue diferente entre los niveles de N aplicado (Figura 3.4). El ICN no fue afectado por los factores estudiados.

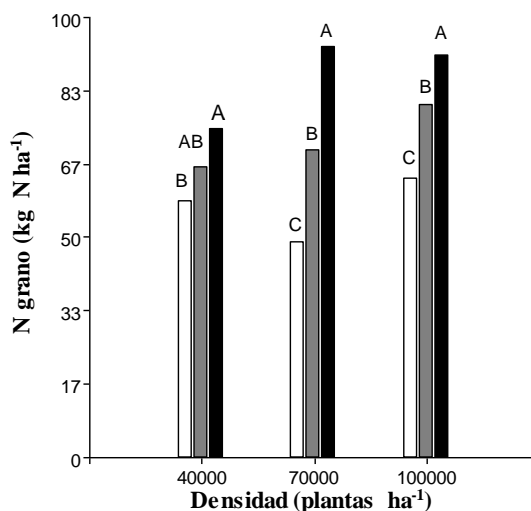


Figura 3.4. Nitrógeno acumulado en el grano (N grano) a madurez fisiológica para las diferentes densidades en función de diferentes dosis de N aplicado: 0 kg N ha⁻¹ (barras blancas), 50 kg N ha⁻¹ (barras grises) y 150 kg N ha⁻¹ (barras negras). Letras diferentes expresan diferencias significativas en la respuesta al N para una misma densidad.

3.3.3.6. Índices de eficiencia en el uso del N en función de la densidad y la fertilización

Se evaluó el efecto de distintas dosis de fertilizante y cambios en la densidad de plantas sobre la EAN y sus componentes (ERN y EFN), como también su efecto sobre la PPF_N (Tabla 3.10).

En el caso de la EAN y sus componentes, no existieron interacciones significativas. La EAN fue afectada tanto por la dosis de N ($P=0,0013$) como por la densidad ($P=0,0335$). Al aplicar 50 kg N ha⁻¹, prácticamente se duplica los kg de grano de maíz que obtengo por kg de N aplicado, respecto a la dosis de 150 kg N ha⁻¹. En el caso de la densidad, no hubo diferencias entre las densidades de 100000 y 700000 plantas ha⁻¹, pero sí entre estas dos y la densidad de 40000 plantas ha⁻¹, donde la EAN cayó en más de un 60% respecto a las densidades más altas.

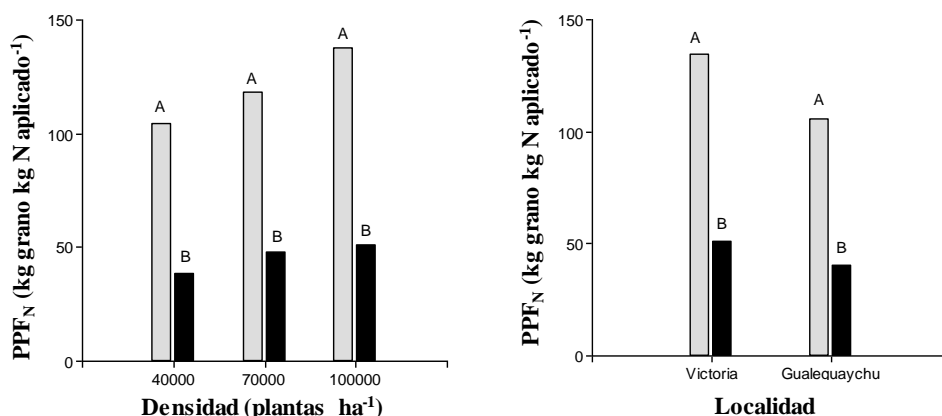
Al analizar el efecto de la dosis de N y densidad sobre los componentes de la EAN, se observó que estos factores no afectaron la EFN, pero sí la ERN, y los patrones observados fueron similares a los observados al analizar la EAN. La ERN, disminuyó de 0,63 a 0,38 kg N absorbido por kg N aplicado, al pasar de 50 kg N ha⁻¹ a 150 kg N ha⁻¹. En el caso de cambios en la densidad poblacional, la densidad media (70000 plantas ha⁻¹) y alta (100000 plantas ha⁻¹) se diferenciaron de la densidad de 40000 plantas ha⁻¹, donde la ER fue de 0,32 respecto a los valores de 0,62 y 0,56 encontrados en las densidades media y alta respectivamente.

Tabla 3.10. Eficiencia agronómica del nitrógeno (EAN) y sus componentes; la eficiencia de recuperación del nitrógeno (ERN) y la eficiencia fisiológica del nitrógeno (EFN); junto con el factor parcial de productividad N (PPF_N) en función de la dosis de N aplicado y la densidad.

	EAN	ERN	EFN	PPF _N
	(kg grano kg N aplicado ⁻¹)	(kg N absorbido kg N aplicado ⁻¹)	(kg grano kg N absorbido ⁻¹)	(kg grano kg N aplicado ⁻¹)
Localidad				
Victoria	19,2 A	0,59 A	32,3 A	92,4 A
Gualeguaychú	17,6 A	0,42 B	42,0 A	73,1 B
Dosis de N (kg ha ⁻¹)				
50	24,6 A	0,63 A	39,1 A	120,0 A
150	13,2 B	0,38 B	34,9 A	45,5 B
Densidad (plantas ha ⁻¹)				
100000	22,2 A	0,56 A	39,6 A	94,2 A
70000	25,7 A	0,62 A	41,6 A	82,8 B
40000	8,9 B	0,32 B	28,8 A	71,3 C
ANOVA		valor P		
Modelo	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Localidad (Loc)	0,4263	0,0418	0,0630	<0,0001
Densidad (D)	0,0335	0,0243	0,3836	0,0058
Dosis de N (N)	0,0013	0,0030	0,4016	<0,0001
Loc x D	0,3111	0,3022	0,3827	0,6256
Loc x Fert	0,9994	0,4154	0,2403	0,0114
D x Fert	0,3395	0,6713	0,8276	0,0343
Loc x D x Fert	0,5985	0,8327	0,1377	0,8270

Medias acompañadas con una letra común no son significativamente diferentes según test LSD ($\alpha=0,05$)

Las interacciones localidad por dosis de fertilizante y densidad por dosis de fertilizante fueron significativas para PPF_N ($P<0,05$) (Tabla 3.10). En ambos casos, la PPF_N fue menor para la dosis de 150 kg N ha⁻¹ que para la dosis de 50 kg N ha⁻¹ y la interacción estuvo dada por cambios en la magnitud de estas diferencias. Los cambios de PPF_N fueron mayores con la densidad superior y en la localidad Victoria (Figuras 3.5 a y b).



3.5 a

3.5 b

Figura 3.5. Productividad parcial del factor Nitrógeno (PPF_N) para las diferentes densidades (a) y distintas localidades (b) en función del N aplicado con el fertilizante 50 kg N ha⁻¹ (barras grises) y 150 kg N ha⁻¹ (barras negras). Letras diferentes expresan diferencias significativas en la respuesta al N para una misma densidad o una misma localidad.

3.4. Discusión

La discusión está estructurada en cuatro secciones, una primera sección donde se discute el efecto del ambiente sobre los experimentos, la segunda sección aborda el efecto de la fertilización nitrogenada sobre la MS y la acumulación de N en planta. La tercera sección aborda el efecto de la densidad y la interacción con el N sobre la MS y acumulación del N por parte del cultivo y la cuarta y última sección aborda como cambios en la fertilización y la densidad afectan la EAN y sus componentes.

3.4.1. Condiciones ambientales exploradas

Las diferencias promedio observadas entre localidades para la MS grano (Tabla 3.3) pueden ser explicadas por la disponibilidad de agua durante el ciclo del cultivo y en el período crítico (Tabla 2.2). Claramente se observa que las condiciones fueron más restrictivas para los experimentos realizados en la campaña 2012-2013 que en el experimento realizado en 2011-2012 (Tabla 2.2).

La disponibilidad de N en PS del cultivo (N-NO₃ 0-60 cm) fue similar en Paraná y Victoria, y algo menor en Gualeguaychú (Tabla 2.3), aunque los valores están dentro del rango de los normalmente registrados en maíces tardíos en la zona, debido a la mayor temperatura y precipitaciones, los valores encontrados en maíz tardío son usualmente mayores que los registrados en maíces tempranos (Salvagiotti et al. 2014). Los valores para P-Bray I, S-SO₄, % de MO, y pH están dentro de los valores usualmente encontrados en Entre Ríos (Tabla 2.1). El área agrícola de Entre Ríos, generalmente presenta deficiencia de P (Sainz Rozas et al. 2011), y los niveles observados en los tres sitios experimentales pueden considerarse de medio a altos para la región. En el caso del N anaeróbico (Nan), no es generalmente analizado en suelos de Entre Ríos. En el sudeste de la provincia de Bs As, actualmente se está trabajando con esta variable como complemento del dato de N-nitrato en el suelo para generar una herramienta de diagnóstico que permita definir la dosis recomendada de fertilizante (Sainz Rosas et al. 2008). Los valores de Nan observados en los sitios experimentales indicarían niveles medios a adecuados según Reussi Calvo et al. (2014).

3.4.2. Efecto de la fertilización N sobre la MS y acumulación de N en planta

El N tiene un efecto sobre el rendimiento y crecimiento del cultivo de maíz (Singletary y Below 1989). El INN indicó que en ninguna de las localidades donde se realizaron los experimentos se alcanzó la concentración mínima de N en planta para maximizar la tasa de crecimiento de los cultivos; aunque los tratamientos fertilizados con N estuvieron más cerca de llegar al N_c que el testigo sin fertilizar (Tabla 3.1). Estos resultados indican que, según lo propuesto por Herrmann y Taube (2004), en todas las localidades hubo una situación de déficit de N siendo esperable encontrar respuesta en rendimiento al agregado de N, tal como se observó en este trabajo (Tabla 3.3 y Tabla 3.8). La respuesta al agregado de N pone de manifiesto que el N es uno de los factores edáficos que podría restringir los rendimientos de maíz tardío (MT) en Entre Ríos tal como ha sido documentado para MT en otras zonas (Fontanetto et al. 2008; Salvagiotti et al. 2012; Salvagiotti et al. 2014; Gambin et al. 2016; Coyos et al., 2018) y para maíz temprano en Entre Ríos (Maddonni et al. 2004; Mercau et al. 2004; Mistrorigo y Valentinuz 2004; Ruiz et al. 2004) y otras zonas de la región pampeana (Barraco y Díaz Zorita 2005; Barbieri et al. 2008; Ferraris et al. 2012; Pagani et al. 2012). El rendimiento se reduce ante deficiencias de N (Lemcoff y Loomis 1986; Cirilo et al. 2009), por una reducción en la capacidad de fotosíntesis y disminución de la tasa de crecimiento durante el período crítico (Uhart y Andrade 1995b; Poponov et al. 2005).

La MS total, también fue afectada por la fertilización (Tabla 3.3), pero no se observaron diferencias significativas entre dosis aplicadas, a pesar que la aplicación de 150 kg N ha^{-1} produjo un incremento de 8% de MS total respecto a la dosis de 50 kg N ha^{-1} . Los valores obtenidos, son menores a los reportados en Balcarce por Uhart y Andrade (1995 a) con dosis de 50 y 180 kg N ha^{-1} y Barbieri et al. (2008) con dosis de 90 y 180 kg N ha^{-1} , tanto en la acumulación total de MS, como en la respuesta obtenida, aunque estos experimentos fueron realizados en maíces tempranos. Caviglia et al. (2014), en ensayos realizados en Paraná, reportaron que, a igual dosis de N aplicado, los maíces tardíos tenían en promedio 34% a 48% menos MS total que los maíces sembrados en época tradicional, y que las diferencias en la acumulación de MS grano eran mayores que la MS resto. A pesar de esto, debido a que en este trabajo el IC no fue afectado por la fertilización, se puede inferir que los cambios en el rendimiento en grano se deben principalmente al aumento de la MS producido por el agregado de N.

El PMG también fue afectado por la aplicación de N (Tabla 3.3), esto es coincidente con lo encontrado por Lemcoff y Loomis (1986), quienes han reportado incrementos en el peso de los granos de hasta el 45% por aumentos en el suministro de N. Meyer et al. (2012) reportaron incrementos de 23.5% por el agregado de $200 \text{ kg de N ha}^{-1}$ y Melchiori et al. (2004) en experimentos realizados en Entre Ríos entre los años 1994 y el 2003 encontraron una respuesta positiva al incremento del peso de los granos por el agregado de N, este fluctuaba entre el 11% y el 33% respecto al testigo no fertilizado. Se ha documentado una relación entre la reducción en el peso de los granos y la disminución de la fuente de asimilados durante el llenado de los granos (Borras et al. 2004). Banziger et al. (2002) señalan que el incremento de N retarda la senescencia y esto contribuye a lograr mayores pesos de granos. Dos indicadores para evaluar la senescencia y el contenido de N en hoja en este trabajo fueron el número de hojas verdes a MF y el Índice de Verdor medido a través del SPAD. El número de hojas verdes a MF, fue afectado por la aplicación de N (Tabla 3.2), y se registraron diferencias inclusive entre dosis de N aplicado. En el caso del Índice de Verdor, en la evaluación de R3, se observó la misma tendencia que en la evaluación del número de hojas verdes a MF (Tabla 3.1). Sin embargo, el menor nivel de respuesta encontrado en este trabajo al incremento del peso de los granos por agregado de N, podría deberse a que para los maíces sembrados en

diciembre-enero, tanto el período crítico como el llenado de los granos están sujetos a un progresivo deterioro de las condiciones fototermales. En coincidencia con esto, Bonelli et al. (2016) estudiaron como el atraso de la fecha de siembra afecta los componentes de rendimiento y la relación fuente/destino. La progresiva reducción en la temperatura y la radiación durante el período reproductivo en maíces tardíos genera que la fuente sea más limitante que la demanda de asimilados por parte de los granos (Bonelli et al. 2016). En efecto, se puede observar en la Figura 3.6 que, para la zona de estudio, en maíces tardíos las condiciones de radiación y temperatura durante el PC y llenado de los granos que atravesaría DK72-10 son de peor calidad que en maíces tempranos.

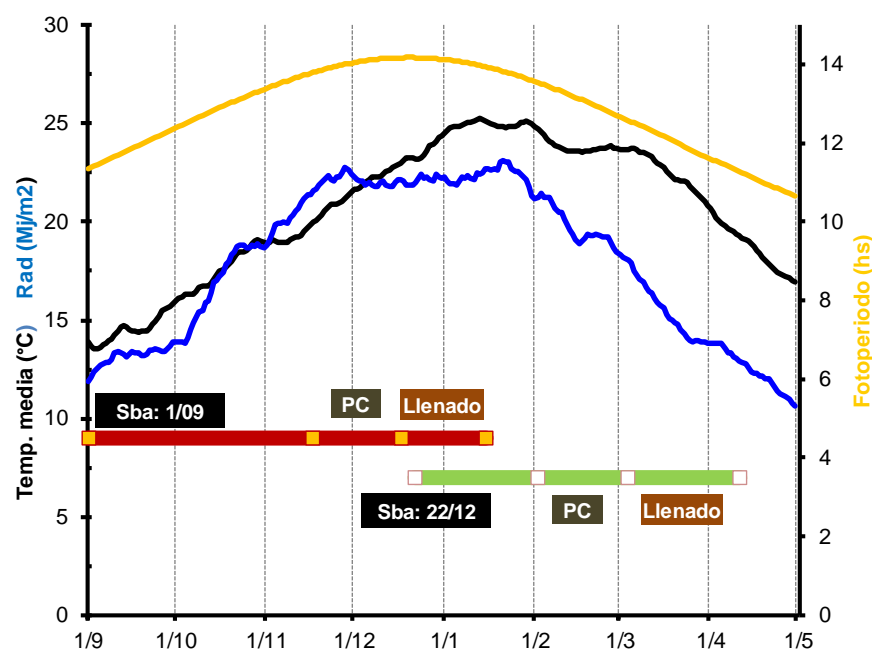


Figura 3.6. Esquema de la ubicación del período crítico y del llenado de los granos de DK72-10, para una fecha de siembra del 1 de septiembre (fecha tradicional, barra roja) o del 22 de diciembre (fecha tardía, barra verde). La línea azul representa la radiación, la negra la temperatura media y la amarilla el fotoperíodo según datos promedios de 40 años para el departamento de Gualaguaychú.

El contenido de nutrientes se incrementa a medida que la biomasa total y rendimiento en grano crece hasta alcanzar un máximo (o plateau) (Setiyono et al. 2010; Ciampitti et al. 2013 b). Ciampitti y Vyn (2012) sugieren que la asociación entre rendimiento en grano y la absorción de N al final de la estación de crecimiento puede ser representada por una función del tipo lineal-plateau. En este trabajo, el agregado de N produjo cambios en el contenido de N acumulado total, en grano y resto (Tabla 3.4), lo cual coincide con lo reportado por Caviglia et al. (2014). Los cambios en el contenido de N en el grano fueron proporcionalmente mayores que en el resto de la planta por efecto de la dosis de N en el rango de dosis de N evaluadas en este trabajo, esto es coincidente con lo reportado por Barbieri et al. (2008) y Subedi y Ma (2007) que también encontraron una respuesta superior en la proporción del N acumulado en grano respecto al N acumulado en planta entera por aplicación de N.

El IC y el ICN no se vieron modificados por el agregado de N, a pesar que el tratamiento con 150 kg N ha^{-1} , presentó IC e ICN levemente mayores respecto del testigo sin fertilizar (Tabla 3.3 y 3.4). Esto coincide con lo reportado por Shapiro y Wortmann (2006), Salvagiotti et al. (2012) y Pagani et al. (2012), quienes tampoco encontraron que el aumento de N afecte el IC y el ICN. Caviglia et al. (2014) observaron que existía

interacción entre el agregado de N y la fecha de siembra, donde el efecto del agregado de N sobre el IC era mayor en siembras tempranas que en siembras tardías.

3.4.3. Efecto de la densidad y de la interacción densidad x N sobre la MS y acumulación de N en planta.

De las especies de gramíneas cultivadas, el maíz es la más sensible a variaciones en la densidad de plantas (Sangoi 2000). Mientras el rendimiento por planta disminuye al aumentar la densidad, el rendimiento por unidad de área presenta una respuesta parabólica, se incrementa hasta un máximo a partir del cual el aumento en el número de individuos reduce el rendimiento del cultivo (Kruk y Satorre 2003). En este trabajo se observaron incrementos del 27% en la MS grano del cultivo por aumentar la densidad de 40000 a 100000 plantas ha^{-1} . Aumentos en el rendimiento del cultivo al aumentar la densidad se explican por la escasa plasticidad vegetativa y reproductiva del maíz (Vega y Andrade 2000).

Sarlangue et al. (2007) determinaron que incrementos en el rendimiento por aumentos en la densidad estuvieron más asociados con incrementos en la producción de MS total que con mayores IC. En este trabajo no se observaron modificaciones en el IC debido a cambios en la densidad, pero sí los hubo sobre la MS (Tabla 3.8). La acumulación de MS total fue afectada diferencialmente por el N según la densidad de siembra (Tabla 3.8). En la Tabla 3.6, se puede observar que el IV se redujo a medida que se incrementó la densidad, esto podría indicar que, a densidades bajas, la acumulación de MS total no fue limitada por el N. Esto es diferente a lo observado en el INN (Tabla 3.6), donde se puede observar que aun en bajas densidades, el INN no alcanzó el Nc. En el presente trabajo, en algunas ocasiones, el INN generó resultados contradictorios. Esto podría deberse a que la ecuación propuesta por Herrmann y Taube (2004) se desarrolló para maíces de silo (distinto origen de germoplasma y madurez relativa respecto al híbrido utilizado en este trabajo) y a que el muestreo de planta se realizó al momento de corte para la confección del silaje, es decir que la planta entera tiene alrededor de 35% y el grano 55-60% de MS (Herrmann, comunicación personal). En contraste, en este trabajo el muestreo de planta se realizó en madurez fisiológica, por lo cual es esperable encontrar cambios en los componentes del pool metabólico y estructural de la planta. Caviglia et al. (2014) utilizaron el INN en madurez fisiológica en maíces de Entre Ríos y observaron que, si bien extrapolar los parámetros de la curva de dilución de estadios tempranos a madurez fisiológica puede generar diferencias en los valores de NNI, éste fue útil para establecer un ranking de los tratamientos.

La reducción en el peso de los granos con el aumento de la densidad es coincidente con lo reportado por Boomsma et al. (2009) y Ciampitti et al. (2013), y podría atribuirse a la menor tasa de crecimiento por planta durante el período de definición del peso potencial del grano, este último autor habla de mecanismos de *trade-off* en los componentes de rendimiento; peso y número de granos a medida que aumenta la densidad.

Cambios en la densidad produjeron un incremento de la acumulación de N total, tal como indican Shapiro y Wortmann (2006), lo que sugiere una mayor absorción del N disponible orientado a mejorar la ERN. En el caso del contenido de N en grano, se observó una interacción significativa entre los factores densidad y fertilización ($p=0,0148$) (Tabla 3.9). En las densidades de 70000 y 100000 plantas ha^{-1} , el agregado de N produjo incrementos en el contenido de N respecto al testigo y también se observaron diferencias entre dosis de N, a mayor aplicación de N más N acumulado en el grano. En el caso de la densidad de 40000 plantas ha^{-1} , solamente se observaron diferencias entre el testigo y la dosis mayor (Figura 3.4).

3.4.4. Efecto de la fertilización N y cambios en la densidad de plantas sobre la EAN y sus componentes

Para hacer frente a la demanda futura de alimentos se estima que la productividad de los cultivos tiene que aumentar en un 60% (Alexandratos y Bruinsma 2012), esto puede lograrse por un aumento en la superficie agrícola y/o por un aumento de productividad por superficie, los cuales representan un gran desafío desde el punto de vista de la sustentabilidad de los sistemas. Prácticas de manejo que permitan un uso más eficiente de los recursos afectarán tanto la sustentabilidad como la producción. Actualmente, son críticas las líneas de investigación que estudian aumentos en la EAN (Thomson 2012). En este trabajo se observó que la EAN fue afectada por la dosis de N y por cambios en la densidad de plantas (Tabla 3.10). La dosis de 50 kg N ha⁻¹ prácticamente duplicó los kg grano ha⁻¹ por kg N aplicado respecto a la dosis de 150 kg N ha⁻¹ (Tabla 3.10). Esto nos demuestra que, si bien la dosis alta de N produjo un incremento en el rendimiento, este se logró de manera ineficiente, ya que el aumento de rendimiento en grano por pasar de N50 a N150 fue del 14% (Tabla 3.8) pero redujo la EAN *ca.* 50% (Tabla 3.10), lo cual es coincidente con lo reportado por numerosos autores (Muchow 1998; Barbieri et al. 2008; Boomsma et al. 2009; Ciampitti y Vyn 2012; Pasuquin et al. 2012); cuando las dosis de N se acercan al óptimo, la productividad por superficie continúa creciendo, pero a una menor tasa, por lo cual la EAN decae, lo que resulta particularmente importante en maíces tardíos con alta disponibilidad de N inicial en el suelo. En el caso de la densidad, se observó que la EAN fue significativamente menor con 40000 plantas ha⁻¹ respecto a las densidades de 70000 y 100000 plantas ha⁻¹, entre estas dos densidades las diferencias no fueron significativas. Estos resultados coinciden con lo reportado por Boomsma et al. (2009) que en un ensayo de características similares no encontró interacción significativa entre la densidad y la aplicación de N y que ambos factores afectaron significativamente la EAN. Ciampitti y Vyn (2011), también observaron en diferentes híbridos, que la EAN fue siempre mayor para densidades altas y dosis intermedias de N en comparación con dosis altas de N y densidades bajas, pero en este caso encontraron interacción híbrido x densidad x N.

Con el objetivo de lograr un mejor entendimiento del efecto del N en el cultivo, conviene estudiar la EAN a través de sus componentes, la EAN puede ser incrementada por cambios en la ERN, debido a una mayor captura del N aplicado, por aumentos de la EFN, a través de mayores rendimientos por unidad de N capturado o por el aumento de ambas eficiencias. En este estudio se observó que cambios en la densidad y la aplicación de fertilizante afectaron significativamente la ERN y no la EFN. La ERN disminuyó al aumentar la dosis de N aplicado, esto coincide con lo reportado por Moll et al. (1982) y Barbieri et al. (2008) quienes observaron disminuciones en la ERN al aumentar la dosis de N. Barbieri et al. (2008); Pietrobón et al. (2010) y Ciampitti y Vyn (2011), también observaron que aumentos en la densidad de plantas aumentan la ERN. Dobermann (2007) interpretan que la ERN depende de la sincronía entre la demanda del cultivo y la oferta del N del fertilizante. Este autor reporta rangos observados entre 0,3 y 0,8. Aplicaciones de N que excedan el requerimiento específico de determinado genotipo, ambiente productivo y práctica de manejo llevan a menores ERN (Ciampitti y Vyn 2012). Fixen et al. (2014) sugieren que, si los valores de la ERN son bajos, cambios en el manejo del cultivo pueden aumentar la ERN, caso contrario se estaría acumulando N en el suelo. En este contexto, una mejora en la ERN permitiría disminuir el impacto ambiental al reducir los riesgos de pérdidas por lixiviación, volatilización y desnitrificación del N que no es aprovechado por el cultivo, los resultados obtenidos indican la importancia de generar mayores conocimientos acerca de los mecanismos involucrados en la recuperación del N aplicado para mejorar la ERN. Entre tales mecanismos podrían ser relevantes la tasa de

absorción de nutriente por unidad de raíz, el patrón de crecimiento de raíces, la sincronización entre oferta-demanda de nutrientes y el efecto de la disponibilidad de agua en el suelo, entre otros.

La EFN no fue afectada por cambios en la densidad o con la aplicación de N, lo cual difiere de lo encontrado por otros autores. Barbieri et al. (2008) observaron disminuciones en la EFN al aumentar la dosis de N aplicado. Esto podría deberse a la alta disponibilidad inicial del N, diversos autores sugieren que ERN es el componente más importante en situaciones de alta disponibilidad de N, mientras que la EFN es más importante en condiciones de baja disponibilidad de N (Moll et al. 1982; Ma y Dwyer 1998; Caviglia et al. 2014). En los experimentos realizados, la disponibilidad inicial de N en el suelo fue alta por tratarse de un maíz sembrado en fecha tardía como se discutió al inicio de esta sección.

En el caso de la PPF_N se registraron interacciones de la dosis de N con la densidad y la dosis de N con la localidad (Tabla 3.10 y Figuras 3.5 a y b), esto podría estar reflejando diferencias de rendimientos actuales y alcanzables según densidad y localidad. Las bajas densidades muestran menores rendimientos aun sin aplicación de N y la localidad Victoria muestra un mayor potencial de rendimiento que Gualeguaychú. Igualmente, a pesar de las interacciones, para una misma densidad o una misma localidad, la PPF_N fue siempre mayor para la dosis más baja, la PPF_N disminuye con incrementos de dosis de N, como han indicado Fixen et al. (2014). Los valores alcanzables van a depender del potencial de la región, la fertilidad del suelo, la estrategia de fertilización y de otras prácticas de manejo aplicada al cultivo (Norton 2014). Como se evidenció en esta tesis, aumentar la densidad fue una práctica de manejo clave para incrementar los valores de PPF_N . No obstante, para alcanzar altos rendimientos e incrementar aún más la PPF_N , es necesario lograr progresos a nivel de los cultivos, nuevos fertilizantes y técnicas de aplicación, mejorar los modelos de recomendación de fertilización, entender los diferentes factores que interactúan con el cultivo y la fertilización, como también una mejora en la transmisión de dichos conocimientos hacia los productores (Dobermann 2007).

Los resultados hallados en este trabajo no rechazan la hipótesis 1 “un aumento en la dosis de N reduce drásticamente la ERN sin aumentar la EFN” y rechazan la hipótesis 2 “aumentos en la densidad de plantas mejoran la EAN por una mayor ERN, pero los efectos dependen de la dosis de N”, ya que no se registró interacción dosis de N x densidad, pero si se observó que aumentos en la densidad de plantas mejoraron la ERN, sin producir cambios en la EFN y, en consecuencia, mejoraron la EAN.

3.5. Conclusión

La fertilización nitrogenada y los cambios en la densidad afectaron la acumulación de MS y el contenido de N en planta. Ambos se incrementaron por el agregado de N y aumentos de la densidad. Las caídas en la EAN encontradas producto del aumento de la dosis de N y bajas densidades se deben a cambios en la ERN, ya que la EFN no fue afectada por ninguna de las dos prácticas.

**Implicancias de los resultados y posibles investigaciones derivadas
del trabajo**

Capítulo 4: Implicancias de los resultados y posibles investigaciones derivadas del trabajo

4.1 Contraste de hipótesis

De las hipótesis planteadas en este trabajo:

No se rechaza las hipótesis 1, “En siembra tardía, los umbrales de respuesta a la fertilización nitrogenada calibrado a partir de la disponibilidad de NO_3 a la siembra (PS) y en V6, no difieren debido al corto tiempo que transcurre entre esos dos momentos”, ya que no hubo diferencias significativas en el valor del umbral a una misma profundidad de muestreo entre los diferentes momentos. Igualmente, es importante considerar que en PS el ajuste del modelo es mejor que en V6.

No se rechaza la hipótesis 2, “En maíces tardíos, un aumento de la dosis de N reduce drásticamente la ERN sin aumentar la EFN.” Los resultados hallados en este trabajo mostraron que la ERN disminuyó al aumentar la dosis de N, mientras que no se observaron diferencias significativas en la EFN por aumentar la dosis de N. Esta caída en la ERN generó una disminución en la EAN.

Se rechaza la hipótesis 3, “En maíces tardíos, aumentos en la densidad de plantas mejoran la EAN por una mayor ERN, pero los efectos dependen de la dosis de N”, debido a que no se registró una interacción significativa entre la densidad y la dosis de N. Es importante destacar que tanto la densidad como la dosis de N afectaron la ERN y no la EFN. Aumentos en las dosis de N y bajas densidades produjeron caídas en la ERN, por la cual la EAN también disminuyó.

4.2. Implicancia de los resultados

La población mundial continuará creciendo al menos hasta 2050, en ese escenario la agricultura se enfrenta con una demanda mayor de alimentos, fibras, biocombustibles y distintos tipos de bienes de origen agrícola. La tendencia actual indica que la demanda de alimentos aumentará en un 60% en el período 2006-2050 (FAO 2011). Satisfacer esta demanda a partir de un sostenido incremento de los rendimientos y de la calidad de los productos no es el único desafío, cada vez hay más preocupación por el impacto ambiental y social que generan los procesos productivos, donde la agricultura no es ajena a esta situación y hoy está en la mira del conjunto de la sociedad, como responsable de la degradación de los recursos y distintos procesos de contaminación. Hoy el principal desafío como profesionales del agro, es producir más de manera sustentable.

Dentro de la agronomía, el estudio de la nutrición vegetal, es fundamental para aumentar la productividad y calidad de los cultivos. La fertilización se ha transformado en una herramienta insustituible en la agricultura moderna, pudiendo tener implicancias positivas desde el punto de vista de la producción y calidad, como externalidades negativas si se realiza un mal manejo de la misma. En la región pampeana, el N es el nutriente que en mayor medida limita el rendimiento del maíz. Asimismo, en los últimos años, la proporción de maíz sembrado en fechas tardías se ha ido incrementando con el objetivo de aumentar la estabilidad de los rendimientos. Sin embargo, se han planteado dudas sobre la validez de los modelos de diagnóstico de fertilidad nitrogenada desarrollados en fechas tempranas. Este trabajo surge debido a los escasos conocimientos respecto a cómo manejar la fertilización nitrogenada en maíz tardío en la provincia de Entre Ríos, y aborda la problemática a partir de un enfoque capaz de ser adoptado por productores y estudia indicadores de la sustentabilidad del sistema como son la EAN y sus componentes. En la primera sección se abordó el desarrollo de una metodología de diagnóstico para recomendar la dosis de N aplicar a partir de la disponibilidad de N en el

suelo y en la segunda sección se analizó la respuesta al agregado de N y cambios en la densidad de plantas sobre la EAN y sus componentes.

El estudio de la respuesta a la fertilización nitrogenada y la calibración de umbrales críticos arrojó como resultados más destacados que, a pesar de contar con una mayor disponibilidad inicial de N en el suelo que los maíces sembrados en fechas tradicionales, la fertilización produjo incrementos significativos en el rendimiento del maíz tardío. Sin embargo, debido a la alta variabilidad en los rendimientos alcanzados en los diferentes sitios, el ajuste de un único modelo que relacione el rendimiento con el Nd, presentó un muy bajo ajuste. Esto pudo ser explicado por diferencias en la disponibilidad de agua en los diferentes lotes durante el período crítico. Para reducir esta variabilidad y mejorar la capacidad de diagnóstico y recomendación, se puede optar por utilizar el RR, para así poder analizar en conjunto los datos de todas las localidades o bien segmentar por ambientes según el rendimiento esperado. Si bien no hubo diferencias en explicar la asociación entre el Nd y rendimiento utilizando un modelo lineal-plateau o cuadrático-plateau, se sugiere utilizar el primero por ser más sencilla su explicación, pensando en la difusión de la herramienta a productores. Respecto al momento y profundidad de suelo a muestrear, el modelo logró un mejor ajuste en PS que en V6, a pesar de que no existieron diferencias significativas en el umbral que se obtiene de ambos modelos. En consecuencia, los resultados sugieren que el muestreo se puede realizar hasta los 20 cm de profundidad, ya que en PS no hubo diferencias en el ajuste por aumentar la profundidad de muestreo. Este punto ya fue abordado con mayor detalle en la discusión, pero no deja de llamar la atención que los pocos trabajos que recomiendan la profundidad 0-20 cm, son todos trabajos realizados en Entre Ríos. Debido a la presencia de un horizonte B textural, característico en los suelos de Entre Ríos, muestrear solamente los primeros 20 cm es una ventaja operativa importante a la hora de realizar la recomendación. Debido a todo lo detallado anteriormente, se ha logrado generar una herramienta de diagnóstico a partir del Nd en el suelo para que el productor pueda decidir la cantidad de fertilizante aplicar en maíces tardíos en Entre Ríos. Si el productor puede predecir el rendimiento esperado, puede utilizar el modelo que relaciona el Nd (suelo + fertilizante) con el rendimiento, donde se han desarrollado 3 modelos según el ambiente esperado. Si por el contrario tiene dificultades en definir el rendimiento esperado puede optar por utilizar el modelo general que incluyó todos los datos.

Una de las formas de evaluar la productividad y sustentabilidad de los sistemas es a través del estudio de la EAN, ya que esta indica cuanto aumenta el rendimiento a medida que aumenta la dosis de N aplicado como fertilizante. Para la implementación de estrategias de manejo que mejoren la EAN, es imprescindible comprender sus componentes. Los resultados de este trabajo demostraron que tanto la fertilización nitrogenada como cambios en la densidad afectaron la EAN, y que estos cambios se debieron a cambios en la ERN, ya que la EFN no fue modificada. Esto tiene gran implicancia desde el punto de vista de la sustentabilidad, ya que la ERN mide que proporción del N aplicado como fertilizante es absorbido por la planta y cuanto queda en el suelo con riesgo de pérdida y, por ende, ser una fuente de contaminación. Aplicando dosis de N150, se recuperó menos de la mitad del N que se aplicó, lo cual resulta lógico ya que si se considera el N del suelo y los modelos ajustados en esta tesis que relacionan el RR con Nd (suelo + fertilizante), la dosis de N150 estuvo por sobre el umbral. Esto demuestra que dosis excesivas de N no traen beneficios desde lo productivo y aumentan considerablemente el riesgo de contaminación. En el caso de la densidad, los resultados indican que aumentos en la densidad permitieron aumentar la recuperación del N aplicado como fertilizante y esto mejoró la EAN. Es importante destacar la diferencia observada entre la densidad de 40000 y 70000 plantas ha^{-1} , ya que la mayoría de los productores

llegan a cosecha con densidades que están dentro de esos rangos, y los resultados indican que con 70000 plantas ha^{-1} fue posible recuperar casi un 50% más del N aplicado que con 40000 plantas ha^{-1} . Estos resultados demuestran la importancia que pueden tener las prácticas agronómicas para mejorar la eficiencia de uso del N y, por lo tanto, la productividad y sustentabilidad del sistema.

4.3. Posibles investigaciones derivadas del trabajo

Se debe destacar que aún existen preguntas que este trabajo no pudo responder por lo que es posible proponer algunas líneas derivadas del mismo. En el caso del análisis de las EAN y sus componentes, sería interesante testear más densidades entre el rango de 40000 y 70000 plantas ha^{-1} , considerando las diferencias que se vieron entre estas dos densidades y que la mayoría de los productores trabajan con densidades que están entre estos valores. En el caso de la dosis de fertilizante, conociendo los umbrales para maíz tardío en Entre Ríos, se podría trabajar con dosis de fertilizante entre los 25 y 75 kg de N ha^{-1} y no tan extremas como las que se utilizaron para calcular la EAN y sus componentes. En el caso de los umbrales generados, se seleccionaron localidades dentro de los departamentos que mayor superficie de maíz siembran en la provincia de Entre Ríos, donde a su vez el rendimiento promedio en general es mayor que en otros departamentos, existe por lo tanto cierta incertidumbre para predecir si los modelos generados tienen la misma precisión en departamentos menos productivos con mayor predominancia de suelos vertisoles y con menores niveles de uso de tecnología por parte de los productores como pueden ser los departamentos de Villaguay o Federación.

Sería interesante realizar un análisis de la recomendación de la fertilización nitrogenada considerando momento, fuente y forma de aplicación, seguramente con los resultados obtenidos se puedan profundizar diferentes aspectos de los 4R de manejo responsable de nutrientes (IPNI 2013) para seguir mejorando la productividad y sustentabilidad del sistema. Tampoco se abordó el efecto que puede tener la fertilización nitrogenada sobre la calidad del grano, lo cual puede ser otra línea de trabajo interesante, sobre todo si se considera que una parte importante del maíz producido en Entre Ríos se utiliza localmente en la alimentación animal, principalmente de animales monogástricos.

Finalmente, sería de interés evaluar la respuesta del MT a otros nutrientes deficientes en la provincia de Entre Ríos como el caso del fósforo y el azufre y su interacción con la fertilización nitrogenada.

BIBLIOGRAFIA

- Alexandratos N, Bruinsma J (2012) World Agriculture Towards 2030/2050: The 2012 revision. ESA Working Paper Rome, FAO.
- Alvarez R. (coord.) (2007) Fertilización de cultivos de granos y pasturas. Diagnóstico y recomendaciones en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Andrade FH, Cirilo AG, Uhart SA, Otegui ME (1996) Ecofisiología del cultivo de maíz. Dekalb Press. 292 p.
- Andrade FH, Echarte L, Rizzalli R, Della Maggiora A, Casanovas M (2002) Kernel number prediction in Maize under nitrogen or water stress. *Crop Science* 42: 1173-1179.
- Austin AT, Piñeiro G, González Polo M (2006) More is less: agricultural impacts on the N cycle in Argentina. *Biogeochemistry* 79: 45-60.
- Banziger M, Edmeades GO, Lafitte HR (2002) Physiological mechanism contributing to the increased N stress tolerance of tropical maize selected for drought tolerance. *Field Crop Research* 75: 223-233.
- Barbieri PA, Della Maggiora A, Echeverría HE, Pietrobón M, Alvarez F (2012) Evapotranspiración y eficiencia en el uso de agua del cultivo de maíz en respuesta a la fertilización con nitrógeno. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Actas en CD.
- Barbieri P, Echeverría HE, Sainz Rozas HR, Andrade FH (2008). Nitrogen Use Efficiency in Maize as Affected by Nitrogen Availability and Row Spacing. *Agronomy Journal* 100:1094-1100.
- Barbieri PA, Echeverría HE, Sainz Rozas HR, Maringolo M (2010) Fertilización de maíz con urea de liberación lenta: Pérdida por volatilización y eficiencia de uso de nitrógeno. *Ciencia del Suelo* 28: 57-66.
- Barbagelata PA, Pautasso JM, Melchiori RJM (2014) Diagnostico de la fertilización nitrogenada para sorgo en Entre Ríos. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Buenos Aires, Actas en CD.
- Barraco M, Diaz Zorita (2005) Momento de fertilización nitrogenada en cultivo de maíz en hapludoles típicos. *Ciencia de Suelo* 23: 197-203.
- Barraco M, Diaz Zorita M, Miranda W, Alvarez C (2015) Contribución de la fertilización con nitrógeno, fósforo y azufre a la productividad de maíz en la Pampa Arenosa. Simposio Fertilidad 2015, Rosario.
- Below FE (2002) Nitrogen metabolism and crop productivity. *Handbook of plant and crop physiology* 385-406.
- Bender RR, Haegele JW, Ruffo ML, Below FE (2013) Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern transgenic insect protected maize hybrids. *Agronomy Journal* 105: 161-170.
- Berardo A (1994) Aspectos generales de fertilización y manejo del trigo en el área de influencia de la estación experimental INTA Balcarce. INTA EEA Balcarce. Boletín Técnico 128.
- Bert FE, Satorre EH, Ruiz Toranzo F, Podestá GH (2006) Climatic information and decision-making in maize crop production systems of the Argentinean Pampas. *Agricultural Systems* 88: 180-204.
- Bianchini A, Magnelli ME, Canova D, Lorenzatti S, Peruzzi D, Rabasa J, Begnis AS, García F (2004) Diagnostico de fertilización nitrogenada para maíz en siembra directa. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Paraná, Entre Ríos, Actas en CD.

- Black CA (1993) Soil fertility evaluation and control. C.A Black (ed). Lewis Publisher, USA. 721 pg.
- Blackmers TM, Schepers JS (1995) Use a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and Schedule fertigation for corn. *Journal of Production Agriculture*. 8:56-60.
- Bock BR, Kelley KR, Meisinger JJ (1992) Predicting N fertilizer needs for corn in humid regions: Summary and future directions. National fertilizer and Environmental Research Center, Tennessee Valley Authority, Muscle Shoals, AL. En Predicting N fertilizer needs for corn humid region: 115-127.
- Boomsma CR, Santini JB, Tollenaar M, Vyn TJ (2009) Maize morphophysiological response to intense crowding and low nitrogen availability. *Agronomy Journal* 101:1426-1452.
- Bonelli LE, Monzon JP, Cerrudo A, Rizalli RH, Andrade FH (2016) Maize grain yield components and source-sink relationship as affected by the delayed in sowing date. *Field Crop Research* 198: 215-225.
- Borras L, Slafer GA, Otegui ME (2004) Seed dry weight response to source sink manipulations in wheat, maize and soybean: A quantitative reappraisal. *Field Crops Research* 86: 121-131.
- Bremner, JM (1965) Inorganic forms of nitrogen. In Black, CA (Ed), *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Agron Monog. ASA and SSSA, Madison WI: 1179-1237.
- Calviño PA, Andrade FH, Sadras VO (2003) Maize yield as affected by water availability, soil depth and crop management. *Agronomy Journal* 95: 275-281.
- Cassman KG, Dobermann AD, Walters D (2002) Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *Ambio* 31: 132-140.
- Cassman KG, Dobermann AD, Walters DT, Hang H (2003) Meeting cereal demand while protecting natural resources and improving environmental quality. *Annual Review of Environmental Resources* 28: 315-358
- Caviglia OP, Melchiori RJM, Paparotti OF (2005) Eficiencia de utilización del nitrógeno de dos híbridos de maíz en fechas de siembra contrastantes. VIII Congreso Nacional de Maíz Rosario 2005. Trabajos presentados y resumen de conferencias: 190-193.
- Caviglia OP, Melchiori RJM, Sadras VO (2014) Nitrogen utilization efficiency in maize as affected by hybrid and N rate in late-sown crops. *Field Crop Research* 168: 27-37.
- Cerrato ME, Blackmer AM (1990) Comparison of models for describing corn yield response to nitrogen fertilizer. *Agronomy journal* 82:138-143.
- Ciampitti IA, Vyn TJ (2011) A comprehensive study of plant density consequences on nitrogen uptake dynamics of maize plants from vegetative to reproductive stages. *Field Crop Research* 121: 2-18.
- Ciampitti IA, Vyn TJ (2012) Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. *Field Crop Research* 133:48-67.
- Ciampitti IA, Murrell ST, Camberato JJ, Tuinstra M, Xia Y, Friedemann P, Vyn TJ (2013a) Physiological dynamics of maize nitrogen uptake and partitioning in response to plant density and nitrogen stress factors: II Reproductive stages. *Crop Science* 53: 2588-2602.
- Ciampitti IA, Camberato JJ, Murrell ST, Vyn TJ (2013b) Maize Nutrient Accumulation and Partitioning in Response to Plant Density and Nitrogen Rate: I. Macronutrients. *Agronomy Journal* 105:783-794.
- Cirilo AG, Andrade FH (1994) Sowing date and maize productivity: I Crop growth and dry matter partitioning. *Crop Science* 34:1039-1044.

- Cirilo AG, Dardanelli J, Balzarini M, Cantarero M, Luque S, Pedrol HM (2009) Morpho-physiological traits associated with maize crop adaptations to environments differing in nitrogen availability. *Field Crop Research* 113: 116:124.
- Correndo A, García F (2014) Bases de la nutrición del cultivo de maíz. Respuesta a la fertilización con nitrógeno, fosforo, azufre y zinc. Cuadernillo Maíz AACREA.
- Coyos T, Borrás L, Gambin BL (2018) Site specific covariates affecting yield response to nitrogen of late-sown Maize in Central Argentina. *Agronomy Journal* 110: 1-9.
- Diaz Zorita M, Duarte G (1997) Fertilización nitrogenada de maíz en el oeste bonaerense. En: *Actas VI Congreso Nacional de Maíz*: 144-149.
- Dobermann A (2007) Nutrient Use Efficiency – Measurement and management. IFA International Workshop on fertilizer best management practices. 7-9 March, Brussels, Belgium.
- Domínguez GF, Studdert GA, Echeverria HE, Andrade FH (2001) Sistemas de cultivo y nutrición nitrogenada en maíz. *Ciencia del suelo* 19:47-56.
- Food and Agriculture Organization, FAO (2011). Current world fertilizer trends and outlook to 2015. Food and agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- FAOSTAT (2014) <http://faostat3.fao.org/browse/R/RF/E>. Verificada 30/12/2014.
- Ferrari MC, Ostojic JJ, Ferraris GN, Ventimiglia LS, Carta HG, Rillo SN (2001) Momentos de aplicación del fertilizante nitrogenado en maíz de siembra directa. VII Congreso Nacional de Maíz. Pergamino.
- Ferraris GN, Mousegne F, Barraco M, Couretot L, Alvarez C, Barosela H, Bojorge A, Cavo J, Cassina E, Lemos E, López de Sabando M, Magnone G, Martin A, Melilli P, Paganini A, Pereyro A, Pontoni R, Scianca C, Sola R, Telleria M, Ventimiglia L (2012) Respuesta a fosforo y nitrógeno en maíz en el norte-centro-oeste de Buenos Aires. Efecto año, tipo de suelo y nivel de rendimiento. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Actas en CD.
- Fixen P, Brentrup F, Bruulsema T, García F, Norton Rob, Zingore S (2014) Chapter 1. Nutrient/Fertilizer Use Efficiency: Measurement, Current Situation and Trends. IFA, IWMI, IPNI and IPI, April 2014. Copyright 2014 IFA, IWMI, IPNI and IPI.
- Fontanetto H, Keller O, Giailevra D, Belotti L, Negro C (2008) Aspectos del manejo del cultivo de maíz de segunda y de la fertilización nitrogenada en la región pampeana norte de la Argentina. XVI Congreso de Aapresid: 217-224.
- Gallais A, Coque M (2005) Genetic variation and selection for nitrogen use efficiency: a synthesis. *Maydica* 50: 531-547.
- Gallo W.P, Daughtry C.S.T (1986) Techniques for measuring intercepted and absorbed photosynthetically active radiation in crop canopies. *Agronomy Journal*. 78:752-756.
- Galloway J, Raghuram N, Abrol YP (2008) A perspective on reactive nitrogen in a global, Asian and Indian Context. *Current Science* 9: 1375-1381.
- Galloway JN, Townsend AR, Erisman JW, Bekunda M, Cai Z, Freney JR, Martinelli LA, Seitzinger SP, Sutton MA (2008) Transformation of the Nitrogen Cycle: Recent Trends, Questions, and Potential Solutions. *Science* 320: 889-892.
- Gambin BL, Coyos T, Di Mauro G, Borrás L, Garibaldi L (2016) Exploring genotype, management, and environment grain yield of late sown maize in central Argentina. *Agricultural Systems* 146:11-19.
- García FO (2009) Eficiencia de uso de nutrientes y mejores prácticas de manejo para la nutrición de cultivos de grano. Simposio Fertilidad 2009, Actas 9-18.
- García FO, Salvagiotti F (2009) Eficiencia de uso de nutrientes en sistemas agrícolas del cono sur de Latinoamérica. XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del

- Suelo, San José de Costa Rica, Memorias del Simposio Uso Eficiente de Nutrientes presentado por IPNI.
- García FO, Correndo AA (2017) Nutrición de plantas para óptimos rendimientos agrícolas. IV Congreso Nacional de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Asunción, Paraguay: 204-212.
- García F. y M.F. González Sanjuan (2013). La nutrición de suelos y cultivos y el balance de nutrientes: ¿Cómo estamos? Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica. 9:2-7. IPNI Cono Sur. Acassuso, Buenos Aires, Argentina. <http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/issue/IA-LACS-2013-9>.
- Gastal F, Lemaire G (2002) N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. Journal of Experimental Botany. No 370:789-799.
- Gil R (2005) Cálculo del agua edáfica y balance hídrico del cultivo. INTA, curso de capacitación profesional “El funcionamiento físico del suelo y la dinámica del agua en el sistema suelo-planta-atmosfera.
- Good A, Shrawat A, Munech D (2004) Can less yield more? Is reducing nutrient input into the environment compatible with maintaining crop production? Trends Plant Science. 9:597-605.
- González Sanjuan MF, Grasso AA, Bassi J (2013) Fertilizantes en Argentina Análisis del Consumo. Revista Fertilizar N 25: 25-29.
- GraphPad Prism, Graphpad Software, LA Jolla, California, USA. www.graphpad.com
- Gregoret MC, Dardanelli J, Bongiovanni R, Diaz Zorita M (2006) Modelo de respuesta sitio específica del maíz al nitrógeno y agua edáfica en un Haplustol. Ciencia del suelo 24 147-159.
- Gudelj VJ, Vallone PS, Galarza CM, Masiero BL, Gudelj OE, Lorenzon C (2005) Momentos de aplicación de nitrógeno en siembra directa de maíz. Maíz Actualización 2005. Información para extensión N95. INTA Marcos Juárez.
- Gutierrez Boem FH, Rubio G, Alvarez R (2013) Diagnostico de la disponibilidad de nutrientes. En: Alvarez R, Prystupa P, Rodriguez MB, Alvarez CR. Fertilización de cultivos y pasturas. Editorial Facultad de Agronomía: 91-99.
- Herrmann A, Taube F (2004) The range of the Critical Nitrogen Dilution Curve for Maize (*Zea mays* L.) can be extended until silage maturity. Agronomy Journal 96:1131-1138.
- Hokmalipour S, Shiri-e-Janagar M, Darbany MH, Peyghamani-e-Ashenae F, Hasanzadaeh M, Seiedi M, Shabani R (2010) Comparison of Agronomical Nitrogen Use Efficiency in Three Cultivars of Corn as Affected by Nitrogen Fertilizer Levels. World Applied Science Journal 8 :1168-1174.
- INTA (2002) Plan de Tecnología Regional 2001-2004 - Centro Regional Entre Ríos. Documentos Institucionales N° 109.
- INTA (2014). Cartas de Suelo de Entre Ríos. Escala 1:100000 publicadas entre 1986 y 2011. En: <http://geointa.inta.gov.ar/web/index.php/cartas-de-suelos-de-entre-rios/>
- IPNI (2013). 4R de la nutrición de plantas: un manual para mejorar el manejo de la nutrición de plantas. T. W. Bruulsema; Paul E. Fixen; y Gavin D. Sulewski (ed.). Traducción al español. IPNI. Acassuso, Buenos Argentina. ISBN 978-987-24977-5-0.
- Kruk B, Satorre EH (2003). Densidad y arreglo espacial del cultivo. En: E.H. Satorre, R.L. Benech Arnold, G.A. Slafer, E.B. de la Fuente, D.J. Miralles, M.E. Otegui y R. Savin (eds.) Producción de granos: bases funcionales para su manejo. Editorial Facultad Agronomía, Universidad de Buenos Aires, Bs. As., Argentina. Pp.: 277-316

- Lemaire G, Jeuffroy MH, Gastal F (2008) Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. Theory and practices for crop N management. *European Journal of Agronomy* 28: 614-624.
- Lemaire G, Gastal F (2009) Quantifying crop responses to nitrogen deficiency and avenues to improve nitrogen use efficiency. Chapter 8:171-211. *Crop Physiology*.
- Lemcoff JH, Loomis RS (1986) Nitrogen influence on yield determination in maize. *Crop Science* 26: 1017-1022.
- Leopold AC (1975) Aging senescence and turnover in plants. *BioScience* 25:659-662.
- Liu J, You L, Amini M, Herrero M, Zehnder AJB, Yang H (2010) A high-resolution assessment on global nitrogen flows in croplands. *PNAS* vol 17 no10: 8035-8040.
- Loh W (2011). Classification and regression trees. *Wiley interdisciplinary reviews: Data mining and knowledge discovery* 1:14-23.
- Lory JA, Scharf PC (2003) Nitrogen Management: Yield Goal versus Delta Yield for Predicting Nitrogen Need in Corn. *Agronomy Journal* 95: 994-999.
- Ma B, Dwyer L (1998) Nitrogen uptake and use of two contrasting maize hybrids differing in leaf senescence. *Plant and Soil* 199: 283-291.
- Maddoni GA, Mercau JL, Ruiz RA, Satorre EH (2004) Esquemas de alta producción de maíz en la región litoral sur de AACREA (Provincia de Entre Ríos) *Revista Científica Agropecuaria* 8: 79-90.
- Maddoni GA (2012) Analysis of the climatic constraints to maize production in the current agricultural region of Argentina- A probabilistic approach. *Theoretical Application Climatology* 107: 325-345
- Maddoni GA, Otegui ME (1996) Leaf area, light interception, and crop development in maize. *Field Crops Research* 49: 81-87.
- Mayer LI, Rossini MA, Maddoni GA (2012) Inter plant variation of grain yield and components and kernel composition of maize crops grown under contrasting nitrogen supply. *Field Crops Research* 125: 98-108
- Melchiori RJM, Caviglia OP, Kremerer AC (2004) Fertilización nitrogenada sobre los componentes del rendimiento en Maíz en el centro-oeste de Entre Ríos. XIX Congreso Argentino de la Ciencia del suelo, Paraná, Entre Ríos, Actas en CD.
- Melchiori RJM, Caviglia OP (2008) Maize kernel growth and kernel water relations as affected by nitrogen supply. *Field Crop Research* 108: 198-205.
- Mercau JL, Otegui ME (2014) A modeling approach to explore water management strategies for late sown maize and double cropped wheat maize in the rainfed Pampas region of Argentina. In *Advances in Agricultural System Modeling*, volume 5. ASA, CSSA, SSSA, Madison USA, pp 351-373.
- Mi G, Chen F, Zhang F (2007) Physiological and genetic mechanisms for nitrogen use efficiency in maize. *Journal of Crop Science and Biotechnology* 10: 57-63.
- Mistrorigo D, Valentinuz OR, De Carli R (1997) Fertilización de maíz en siembra directa en Entre Ríos. Congreso Nacional de Maíz.
- Mistrorigo D, Valentinuz O (2004) Fertilización de maíz en siembra directa en suelos molisoles y vertisoles del oeste de Entre Ríos. *Revista Científica Agropecuaria* 8: 99-107.
- Moll RH, Kamprath EJ, Jackson WA (1982) Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. *Agronomy Journal* 74: 562-564.
- Morris TF, Murrell TS, Beegle DB, Camberato JJ, Ferguson RB, Grove J, Ketterings Q, Kyveryga PM, Labosky CAM, Mc Grath J, Meisinger JJ, Melkonian J, Moebius Clune BN, Nafzinger ED, Osmond D, Sawyer JE, Scharf PC, Smith W, Spargo JT, Van Es H, Yang H (2018) Strengths and limitations of nitrogen rate

- recommendations for corn and opportunities for improvement. *Agronomy Journal* 111: 1-37.
- Mossier AR, Bleken MA, Chaiwananakupt P, Ellis EC, Freney JR, Howarth RB, Matson PA, Minami K, Naylor R, Weeks KN (2001) Policy implications of human-accelerated nitrogen cycling. *Biogeochemistry* 52: 281-320.
- Muchow RC (1998) Nitrogen utilization efficiency in corn and sorghum. *Field Crop Research* 56: 209-216.
- Norton R (2014) Combating Climate Change through Improved Agronomic Practices and Input-Use Efficiency. *Journal of Crop Improvement* 28: 571-618
- Pagani A, Echeverría HE, Sainz Rozas HR, Barbieri PA (2008) Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz bajo siembra directa en el sudeste bonaerense. *Ciencia de suelo (Argentina)* 26: 183-193.
- Pagani A, Echeverría HE, Andrade FG, Sainz Rozas HR (2009) Characterization of Corn Nitrogen Status with a Greenness Index under Different Availability of Sulfur. *Agronomy Journal* 101: 315-322.
- Pagani A, Echeverría HE, Andrade FH, Sainz Rozas HR (2012) Effects of nitrogen and sulfur applications on grain yield, nutrient accumulation, and harvest indexes in maize. *Journal of Plant Nutrition* 35: 1080-1097.
- Pasuquin JM, Saenong S, Tan PS, Witt C, Fischer MJ (2012) Evaluating N management strategies for hybrid maize in Southeast Asia. *Field Crop Research* 134: 153-157.
- Pietrobón M (2012) Densidad de plantas en el cultivo de maíz (*Zea mays* L.) y su efecto sobre la Eficiencia de Uso de Nitrógeno. Tesis de Magister Scientiae en Producción Vegetal, Facultad de Ciencias Agrarias de la Universidad de Mar del Plata.
- Pietrobón M, Barbieri PA, Andrade FH, Echeverría HE (2012) Practicas de manejo y eficiencia de uso de nitrógeno en granos de maíz (*Zea mays* L.) XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Actas en CD.
- Poponov IA, Sambo P, Schulte Auf'M Erley G, Presterl T, Geiger HH, Engels C (2005) Grain yield and kernel weight of two maize genotypes differing in nitrogen use efficiency at various levels of nitrogen and carbohydrate availability during flowering and grain filling. *Plant Soil* 272: 111-123
- Raun WR, Johnson GW (1999) Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal* 91: 357-363.
- Rencher AC, Schaalje GB (2008) Linear model in statistics. John Wiley and Sons.
- Ritchie S.W, Hanway J.J (1982) How a corn plant develops. Spec. Rep. 48. Iowa State University of Science and Technology, Coop. Ext. Serv., Ames, Iowa.
- Ruiz RA, Satorre EH, Maddonni GA, Carcova J, Otegui ME (2001) Umbrales de decisión para la fertilización nitrogenada en maíz. En: Actas VII Congreso Nacional de Maíz.
- Ruiz RA, Maddonni GA, Mercau JL, Satorre EH (2004) Bases para la fertilización de maíz en la región litoral sur de AACREA (Provincia de Entre Ríos). XIX Congreso Argentino de la Ciencia del suelo, Paraná, Entre Ríos, Actas en CD.
- Salvagiotti F, Castellarin JM, Ferraguti FJ, Pedrol HM (2011) Dosis óptima económica de nitrógeno en maíz según potencial de producción y disponibilidad de nitrógeno en la región pampeana norte. *Ciencia del Suelo* 29 :199-212.
- Salvagiotti F, Ferragutti F, Castellarin J, Manlla A (2012) Respuesta a la fertilización y eficiencia en el uso del nitrógeno en maíz de siembra tardía sobre diferentes antecesores utilizando inhibidores de ureasa. XXIII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Buenos Aires, Actas en CD.

- Salvagiotti F, Ferragutti F, Enrico J, Prieto G (2014) Respuesta a nitrógeno en maíz de fecha tardía según cultivo antecesor. XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, Bahía Blanca, Buenos Aires, Actas en CD.
- Sanchez MA, Ascheri LM (2005) Fertilización nitrogenada de maíz en el sudeste de Córdoba CREA monte Buey-Inrville Campañas 2003-2004 y 2004-2005. INPOFOS Informaciones Agronómicas 27: 18-20.
- Sanchez MA, Muñoz SE (2008) Fertilización nitrogenada de maíz en el sudeste de Córdoba. IPNI Informaciones Agronómicas 39: 20-22.
- Sangoi, L (2000) Understanding plant density effects on maize growth and development: an important issue to maximize grain yield. *Ciência Rural*, Santa Maria 31: 159-168.
- Shapiro CA, Wortmann CS (2006) Corn response to nitrogen rate, row spacing, and plant density in Eastern Nebraska. *Agronomy Journal* 98: 529-535.
- Sainz Rozas HR, Echeverría HE, Barbieri PA (2004) Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no tillage maize. *Agronomy Journal* 96: 1622-1631.
- Sainz Rozas H., Calviño P., Echeverría H., Redolatti, M., & Barbieri P (2008). Contribution of anaerobically mineralized nitrogen to reliability of planting or presidedress soil nitrogen test in maize. *Agronomy Journal* 100:1020-1025.
- Sainz Rozas H, Echeverría HE, Angelini H (2011) Niveles de materia orgánica y Ph en suelos agrícolas de la región pampeana y extrapampeana de Argentina. *IPNI Información Agronómica* 2: 6-12.
- Sainz Rozas H, Echeverría HE, Angelini H (2011) Fosforo extractable en suelos agrícolas de las regiones pampeana y extrapampeana de Argentina. *IPNI Información Agronómica* 4: 14-18.
- SAS Institute Inc (2012) Using JMP 10. Cary, NC: SAS Institute INC.
- Saxton KE, Rawls WJ (2006) Soil water characteristics estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70: 1569-1578.
- Setiyono TD, Walters DT, Cassman KG, Witt C, Dobermann A (2010) Estimating maize nutrient uptake requirements. *Field Crop Research* 118: 158-168.
- Singletary GW, Below FE (1989) Growth and composition of maize kernel culture in vitro with varying supplies of carbon and nitrogen. *Plant Physiology* 89: 341-346.
- Spectrum Technology, Inc (2009) Spad 502 Chlorophyll Meter, Product Manual.
- Steinbach H (2007) Funciones de producción. En: Fertilización de cultivos de granos y pasturas. Diagnóstico y recomendaciones en la Región Pampeana. Editorial Facultad de Agronomía, Universidad de Buenos Aires.
- Subedi KD, MA BL (2007) Dry matter and nitrogen partitioning patterns in bt and non-bt near-isoline maize hybrids. *Crop Science* 47: 1186-1192.
- Sundquist WB, Menz KZ, Neumeyer CF (1982) A Technology Assessment of Commercial Corn Production in the United States- Agricultural Experiment Station University of Minnesota. Station Bulletin 546.
- Sutton M A et al 2013 Our Nutrient World. The Challenge to Produce More Food and Energy with Less Pollution (Edinburgh: CEH and UNEP).
- Tasi HAA (2009) Aplicación de las cartas de suelos de Entre Ríos, Argentina, para evaluar Índices de Productividad Específicos para los principales cultivos agrícolas. Tesis doctoral Universidade Da Coruña.
- Tilman D, Fargione J, Wolff B, D'Antonio C, Dobson A, Howarth R, Schindler D, Schlesinger WH, Simberloff D, Swackhamer D (2001) Forecasting agriculturally driven global environmental changes. *Science* 292: 281-284.

- Thompson H (2012) Food science deserves a place at the table- US agricultural research chief aims to rise the profile of farming and nutrition science. *Nature*, July 12.
- Uhart SA, Andrade FH (1995a) Nitrogen deficiency in maize I: Effects on crop growth, Development, Dry Matter Partitioning and Kernel Set. *Crop science* 35: 1376-1383.
- Uhart SA, Andrade FH (1995b) Nitrogen deficiency in maize II: Carbon-nitrogen interaction effects on kernel number and grain yield. *Crop science* 35: 1384-1389
- Uribeharrea M, Moose SP, Below FE (2007) Divergent selection for grain protein affects nitrogen in maize hybrids. *Field Crop Research* 100: 82-90.
- Ulrich A (1952) Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants. *Annual Review Plant physiology* 3: 207-228.
- Valentinuz OR, Tollenaar M (2004) Vertical Profile of Leaf Senescence during the Grain-Filling Period in Older and Newer Maize Hybrids. *Crop Science* 44: 827-834.
- Vitousek PM, Mooney HA, Lubchenco J, Merillo JM (1997) Human domination of earth's ecosystems. *Science* 277: 494-499.
- Wilson MG, Sasal MC, Caviglia OP (2013) Critical bulk density for a Mollisol and a Vertisol using least limiting water range: Effect on early wheat growth. *Geoderma* 192: 354-361.